



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**VÝVOJ A CHARAKTERIZACE NOVÉ METODY
PŘIPOJOVÁNÍ VÝVODŮ NA TLUSTOU VRSTVU**

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF NEW METHOD OF INTERCONNECTION BETWEEN LEADS
AND THICK FILM LAYER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Hurtík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Pavel Hurtík

ID: 211523

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Vývoj a charakterizace nové metody připojování vývodů na tlustou vrstvu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte metody připojení vývodů na vodivou tlustou vrstvu a materiály k tomuto účelu využívané. Vytvořte testovací vzorky navržené v semestrálním projektu. Provedte experiment galvanického vytvoření měděné vrstvy na tlustovrstvých ploškách s následným ověřením metody připojení vývodů svařováním elektrickým výbojem a optimalizací tohoto procesu. Vytvořené spoje podrobte mechanickému testu a optické inspekci vnitřního rozhraní sváru. Dosažené výsledky popište v bakalářské práci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 3.6.2021

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá různými způsoby připojování vývodů na tlustou vrstvu. Také zahrnuje vývoj a charakterizaci nové metody připojování vývodů, a to bodovým svařováním na technologii tlusté vrstvy. Byly upraveny hroty svářecího pera pro zmenšení velikosti výsledných svarů. Pro dosažení kvalitnějších spojů bylo využito galvanické pokovování kontaktních plošek. Po vytvoření byly svary testovány z pohledu mechanické pevnosti (stříhová síla, pevnost v odlupu) a také zde byla využita optická metoda vyhodnocení kvality svaru pomocí metalografického výbrusu. Využitím této technologie lze dosáhnout nového nerozebíratelného spojení.

Klíčová slova

Bodové svařování, technologie tlusté vrstvy, galvanické pokovení, zkoušky ve stříhu a odloupení

Abstract

This work deals with different ways of interconnection between leads and thick film. It also includes the development and characterization of a new method of connecting leads, namely spot welding on thick film technology. The tips of the welding pen were modified to reduce the size of the resulting welds. To achieve a better-quality connection is used galvanic plating of contact pads. Final welds were then tested by mechanical strength testing (shear test, peel-test) and the optical method of evaluating the quality of the weld using metallographic cutting was used. Using this technology, a new inseparable connection can be achieved.

Keywords

Spot welding, thick film technology, galvanic plating, shear tests and peel tests

Bibliografická citace

HURTÍK, Pavel. *Vývoj a charakterizace nové metody připojování vývodů na tlustou vrstvu*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134671>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Alexandr Otáhal.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Pavel Hurtík</i>
VUT ID studenta:	<i>211523</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2020/21</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Vývoj a charakterizace nové metody připojování vývodů na tlustou vrstvu</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 3.6.2021

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Alexandru Otáhalovi, Ph.D. za přátelský přístup, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 3.6.2021

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD	10
1. TLUSTOVRSTVÁ TECHNOLOGIE	11
1.1 SUBSTRÁT	11
1.2 PASTY.....	12
1.3 TECHNOLOGIE NANÁŠENÍ PAST.....	13
1.3.1 <i>Sítotisk</i>	13
1.3.2 <i>Šablonový tisk</i>	15
1.4 VYPALOVÁNÍ TLV	16
2. METODY PŘIPOJOVÁNÍ VÝVODŮ NA VODIVOU TLUSTOU VRSTVU	17
2.1 PÁJENÍ.....	17
2.1.1 <i>Ruční pájení</i>	17
2.1.2 <i>Pájení přetavením</i>	17
2.1.3 <i>Materiály pro pájení</i>	18
2.2 SVAŘOVÁNÍ.....	18
2.2.1 <i>Termokompresní svařování</i>	18
2.2.2 <i>Ultrazvukové svařování</i>	18
2.2.3 <i>Bodové svařování</i>	19
2.2.4 <i>Wirebonding</i>	20
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	21
3.1 ÚPRAVA SVÁŘECÍCH HROTŮ BODOVÉ SVÁŘEČKY SUNKKO 709A	21
3.2 TEST SVARŮ NA TLV BEZ GALVANICKÉHO POKOVENÍ.....	23
3.3 NÁVRH MOTIVU PRO GALVANICKÉ POKOVOVÁNÍ SUBSTRÁTU	26
3.4 TEORETICKÝ VÝPOČET PRO GALVANICKÉ POKOVENÍ SUBSTRÁTU	28
3.5 PRAKTICKÁ VÝROBA MULTIMOTIVU PRO SUBSTRÁT 50x50MM	31
3.6 VÝMĚNA MĚDĚNÝCH HROTŮ SVÁŘEČKY ZA WOLFRAMOVÉ.....	33
3.7 OPTIMALIZACE GALVANICKÉHO POKOVOVÁNÍ MOTIVŮ	34
3.8 OPTIMALIZACE SVÁŘECÍHO PROCESU A TESTOVÁNÍ KVALITY SVARŮ POMOCÍ MECHANICKÝCH TESTŮ A MIKROVÝBRUSU.....	38
3.8.1 <i>Optimalizace svářecího procesu</i>	38
3.8.2 <i>Testování kvality svarů pomocí mechanických testů</i>	41
3.8.3 <i>Testování kvality svarů pomocí mikrovýbrusu</i>	44
ZÁVĚR	51
LITERATURA.....	53
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	55

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Destičky z korundové keramiky	11
Obrázek 1.2 Příklad vodivé TLV pasty	12
Obrázek 1.3 Princip nanášení TLV past pomocí sítotisku [9]	13
Obrázek 1.4 Diagram rybí kost (fishbone diagram) [9]	14
Obrázek 1.5 Světlost síta [7]	14
Obrázek 1.6 Ukázka a) přímé šablony b) nepřímé šablony [7]	15
Obrázek 1.7 Princip nanášení TLV past pomocí šablonového tisku šablony [7]	15
Obrázek 1.8 Teplotní průběh vypalování TLV [9]	16
Obrázek 1.9 Sktruktura TLV pasty po vypálení [9]	16
Obrázek 2.1 Princip selektivního pájení součástek	17
Obrázek 2.2 Princip funkce tepelné komprese [13]	18
Obrázek 2.3 Princip ultrazvukového svařování [14]	19
Obrázek 2.4 Princip funkce bodového svařování [15]	19
Obrázek 2.5 Dva hlavní druhy spojení drátu a plošky pro wirebonding [16]	20
Obrázek 3.1 Detailní popis pulzní bodové svářečky SUNKKO 709A	21
Obrázek 3.2 Hroty pohyblivého svářečícího pera a) před úpravou a b) po úpravě	22
Obrázek 3.3 Detail hrotů svářečky a jejich zčernání	23
Obrázek 3.4 Používané materiály pro vývody při bodovém svařování	23
Obrázek 3.5 Niklem pokovený plíšek svařený k TLV pomocí dvou svarů	24
Obrázek 3.6 Pohled na TLV vývody po odtržení niklových pásků	25
Obrázek 3.7 Návrh Multi-motivu pro experiment galvanického pokovování	26
Obrázek 3.8 Okótované důležité parametry navrženého motivu	28
Obrázek 3.9 Princip galvanického pokovování [19]	29
Obrázek 3.10 Nanesený fotorezist na sítu	31
Obrázek 3.11 Princip nanášení pasty	31
Obrázek 3.12 Jeden natištěný multi-motiv	32
Obrázek 3.13 Příklad multi-motivu a) před b) po výpalu	32
Obrázek 3.14 Upravené hroty svářečky a) měděné b) wolframové	33
Obrázek 3.15 Rozřezání multimotivu na jednotlivé motivy	34
Obrázek 3.16 Samotný proces galvanického pokovování	34
Obrázek 3.17 Potřebná zařízení pro galvanické pokovování	35
Obrázek 3.18 Porovnání motivů před a po galvanickém pokovení 10 μm	35
Obrázek 3.19 Pokovené motivy tloušťkou a) 10 μm b) 20 μm c) 30 μm	36
Obrázek 3.20 Zkoumání povrchu pokovení pod mikroskopem	36
Obrázek 3.21 Části pokoveného povrchu 30 μm , kde se nachází A) díry a trhliny v povrchu mědi B) rovné plošky mědi	37
Obrázek 3.22 Povrch pokovených plošek po odtrnutí niklového plíšku a při průchodu a) ideálního proudu 250 A b) velmi vysokého proudu 300 A	38
Obrázek 3.23 Všechny použité vzorky pro první testování nejlepšího nastavení svářečícího procesu	39
Obrázek 3.24 Zařízení pro tahové zkoušky vodičů na DPS [21]	41
Obrázek 3.25 Zařízení pro tahové zkoušky a) bez b) s uchycovacími čelistmi pro ujištění keramického substrátu a niklového plíšku	41
Obrázek 3.26 Rozdíl v uchycení dle typu tahového testu a) ve stříhu b) při zkoušce přilnavosti (Peel test)	43
Obrázek 3.27 Tekutá a sypká složka Methylmetakrylátové pryskyřice	44
Obrázek 3.28 Čtyři typy pokovení a) před b) po zalití do methylmetakrylátové pryskyřice	45
Obrázek 3.29 Brusné papíry o hrubosti a) 800 b) 1500	45

Obrázek 3.30 Použité diamantové brusné pasty o hrubostech zrn 20 μm , 5 μm , 2,5 μm a 0,5 μm	46
Obrázek 3.31 Optická inspekce mikro výbrusu pro substrát a) bez galvanického pokovení b) s galvanickým pokovením 30 μm	47
Obrázek 3.32 Motorizovaný mikroskop ZEISS Axio Imager 2.....	48
Obrázek 3.33 Svary při 250 A zobrazené pomocí mikroskopu ZEISS Axio Imager 2.....	49
Obrázek 3.34 Svary při 225 A zobrazené pomocí mikroskopu ZEISS Axio Imager 2.....	49
Obrázek 3.35 Svary při 200 A zobrazené pomocí mikroskopu ZEISS Axio Imager 2.....	50

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3.1 Přehled používaných materiálů pro bodové svařování	24
Tabulka 3.2 Soupiska použitých plošek pro jeden substrát z navrženého Multi-motivu	27
Tabulka 3.3 Označení a nastavení jednotlivých svářecích procesů	40
Tabulka 3.4 Naměřené hodnoty pro tahovou zkoušku střihem	42
Tabulka 3.5 Naměřené hodnoty pro odlupovou zkoušku (<i>Peel test</i>)	43

ÚVOD

Tlustovrstvá technologie je dnešní alternativou ke klasické výrobě desek plošných spojů. Je využívána všude tam, kde je potřeba zajistit vysokou životnost, mechanickou a elektrickou pevnost i chemickou a tepelnou odolnost. Uplatnění nalézá např. v automobilovém průmyslu, mikrovlnné technice nebo v hybridních integrovaných obvodech ad. Tato technologie disponuje vysokou úrovní integrace, které lze dosáhnout i při nízkých nákladech na výrobu. Hybridní integrované obvody a tlustovrstvá čidla se v průmyslu používají i při vyšších teplotách, kdy technologie měkkého pájení nevyhovuje. Z tohoto důvodu se využívá například ultrazvukového sváření, tvrdého pájení či mechanické uchycení. Tyto technologie mohou být však problémové z pohledu kompatibility s danými materiály vývodů či tlustovrstvých kontaktních plošek. Z těchto důvodů byla v této práci snaha využít a optimalizovat metodu bodového svařování na tlustou vrstvu, jež by našla uplatnění například u platinových tlustovrstvých snímačů teploty nebo u tlustovrstvých anemometrů.

Bodové svařování je typ odporového svařování v elektrotechnice nejčastěji využíván pro spojování baterií. Tímto spojováním vzniká tzv. battery-pack. Tato práce se zabývá převážně nepřímým bodovým svařováním, jež má obě elektrody na stejné straně svařovaného objektu. Principiálně zde dochází k průchodu vysokých proudů, které způsobí natavení materiálu a při zchlazení jsou následně dané materiály spojeny.

Práce se snaží jak teoreticky, tak prakticky popsat nejlepší možný způsob připojení vodičů na vodivé plošky tlustovrstvé technologie pomocí speciálně upravených svářecích hrotů. První část se zabývá rešerší jiných metod připojování vodičů na tlustou vrstvu a technologií tlusté vrstvy. Druhá část se již blíže zabývá samotným ověřením svařování na tlusté vrstvě a správnou optimalizací této metody pro dosažení uspokojivých svarů jež byly testovány jak z mechanického, tak optického hlediska.

1. TLUSTOVRSTVÁ TECHNOLOGIE

Pro uvedení do problematiky připojování vývodů je potřeba si uvědomit o jakou technologii se jedná. V tomto případě se jedná o tlustovrstvou (dále jen „TLV“) technologii, kde dochází k vytvoření vodivých, odporových či dielektrických typů cest na nejčastěji korundové keramice představující substrát.

1.1 Substrát

Jak už bylo výše řečeno, nejčastěji používaným materiálem pro substrát TLV je korundová keramika (viz. Obrázek 1.1). Tento materiál se vyrábí s obsahem 92-96 % oxidu hlinitého (Al_2O_3 – Alumina), a proto disponuje velkou mechanickou pevností i při vysokých teplotách [1; 2]. Pochopitelně nezbytným faktorem pro použití tohoto materiálu jako substrátu je elektroizolační pevnost, která nám zajistí elektrické oddělení součástek.



Obrázek 1.1 Destičky z korundové keramiky

Dalšími vlastnostmi jsou vysoká tepelná vodivost, chemická odolnost vůči agresivním látkám a žáruvzdornost. Je potřeba si však uvědomit, že korundová keramika je poměrně křehký materiál. [3]

Výroba umělého bílého korundu spočívá v tavení čistého oxidu hliníku v pecích, nejčastěji indukčních. Po přetavení a následném vychladnutí se výsledný materiál opracuje podle požadavků zákazníka. Mezi způsoby opracování patří například lisování, broušení, leštění a výpal pro zajištění naprosté rovinnosti povrchu. Až po vypálení dostane korundová keramika své typické vlastnosti. Teplota výpalu korundové keramiky je 1610 °C. Tyto již zmíněné technologické kroky jsou nezbytné k tomu, aby námi nanesená TLV byla na substrát správně natištěna. [2; 3]

1.2 Pasty

TLV jsou na keramickém substrátu vytvářeny šablonovým tiskem nebo sítotiskem. Pro vytvoření TLV motivů je zapotřebí různých typů past (viz. Obrázek 1.2). Ty se dělí na vodivé, dielektrické, odporové, izolační a krycí. Těžší částice mohly klesnout na dno a tím změnit vlastnosti pasty. Z tohoto důvodu je třeba každou pastu před použitím důkladně promíchat.



Obrázek 1.2 Příklad vodivé TLV pasty

Dělení TLV past podle funkce:

- **Vodivé pasty** – využívají se pro zhotovení kontaktů, vodivých a signálových cest mezi součástkami. Pasta má své vodivé vlastnosti až po vypálení. Funkční složkou zde bývají drahé kovy jako např. stříbro, zlato, paládium, platina a jejich slitiny. Tyto vzácné kovy jsou také velmi chemicky odolné. Teplota výpalu je také jedním z parametrů udávaným výrobcem v katalogu. Ty se pro vodivé pasty pohybují v rozmezí 800–1000 °C. [4; 5]
- **Odporové pasty** – časté využití v elektrotechnice nalézají v realizaci tzv. TLV rezistorů jejichž odpory se počítají jako odpor na čtverec. Tyto odpory jsou řádově 10^1 - $10^9 \Omega/\square$. Funkční složkou zde bývají oxidy vzácných kovů. Výpal zde probíhá při 850 °C po dobu 1 hodiny. [4; 5]
- **Dielektrické pasty** – velmi používaný prvek pro tento typ pasty je titaničitan barnatý (BaTiO_3). Pomocí funkční složky upravujeme permitivitu tak jak potřebujeme. Uplatnění nalézají při výrobě kondenzátorů o malých kapacitách, které se zakomponují do topologie integrovaného obvodu. [4; 5]

- **Izolační a ochranné pasty** – Ochranné pasty slouží k ochraně součástek před vnějšími vlivy pasty izolační pasty k izolovanému křížení vodivých drah. [4; 5]

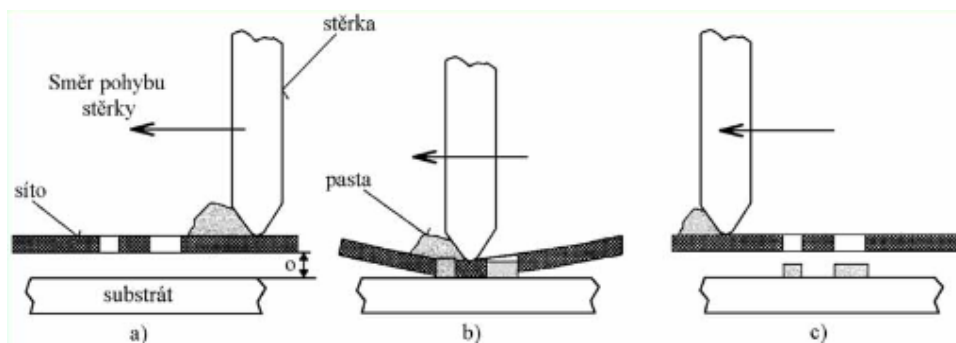
1.3 Technologie nanášení past

1.3.1 Sítotisk

Zmíněná technologie byla vůbec jednou z prvních, co se týče nanášení TLV. Přesto je v dnešní době stále používanější metodou nanášení past. Jedná se o technologii, při níž se pasta protlačuje sítotiskovou šablonou daného motivu. Motivy zde mohou být vytvořeny jak pro vodivé cesty, tak pro odporové cesty. [5]

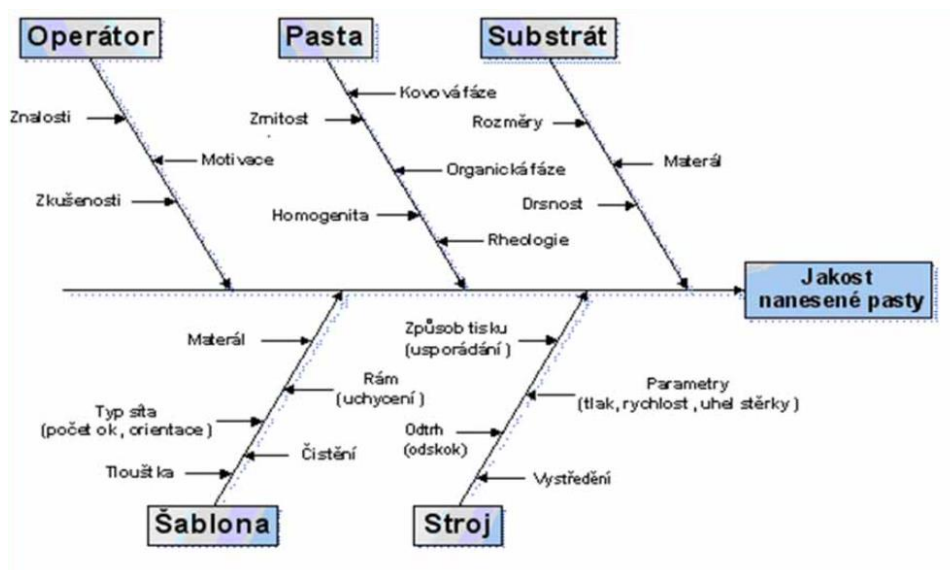
Nejdříve se upevní síto do sítotisku a pečlivě se nastaví vzdálenost síta od substrátu pro zajištění dostatečného odtrhu těrky. Jak již bylo řečeno, pokud na pastu působí smykové napětí, sníží se její viskozita a tím ji lze použít pro tisk pomocí sítotisku. Pokud toto napětí nepůsobí, její viskozita vzroste a tím hrozí k zalepení ok síta pastou. Proto je zapotřebí dosáhnout požadované vzdálenosti mezi sítem a substrátem neboli tzv. odtrhu těrky a tím předejít k zalepení síta. [5; 6]

Po vhodném nastavení polohy substrátu je možné nastavení přtlaku, rychlosti, sklonu, a odtrhu těrky. Jakmile jsou všechny parametry nastaveny, je možné začít s tiskem TLV a případně některý z parametrů dodatečně upravit (viz. Obrázek 1.3).



Obrázek 1.3 Princip nanášení TLV past pomocí sítotisku [9]

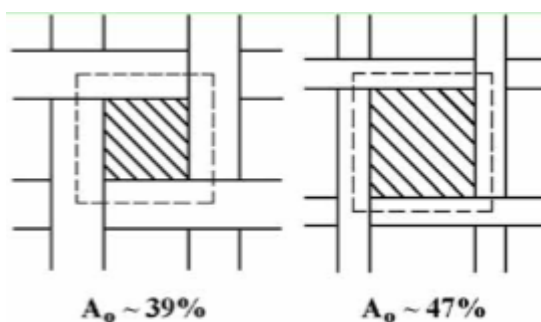
Je vhodné čerstvě natisknutou vrstvu nechat odpočívat před zasoušením alespoň 10 minut od natištění. Jedná se o postup zvaný *leveling*. Povrch čerstvě natištěné pasty není dokonale hladký, proto se nechává chvíli odpočívat, aby se povrch slil a vytvořil hladkou vrstvu.



Obrázek 1.4 Diagram rybí kost (fishbone diagram) [9]

Výsledek natištění pasty závisí na mnoha faktorech pro zajištění požadované jakosti tisku (viz. Obrázek 1.4). Síta jsou vyráběna z polymerních materiálů nebo nerezových ocelí. Mohou mít různé způsoby tkaní a vzorů. Síťovina je upínána nejčastěji do hliníkového rámu, ale může být také plastový či dřevěný. [6]

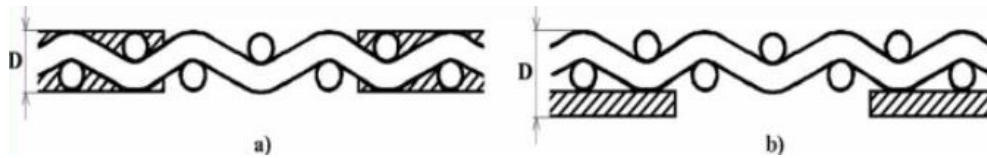
- **Světlost síta** – definuje poměr zaplněné části ok k průchodné části ok. Jinými slovy, pokud zvyšujeme průměr vláken síta, pak světlost síta klesá a opačně (viz. Obrázek 1.5).



Obrázek 1.5 Světlost síta [7]

- **Počet ok** – definuje počet ok na cm nebo na palec (Mesh)
- **Průměr vlákna**
- **Přímá šablona** – vznikne nanesením fotocitlivé emulze, která se nechá ve tmě zaschnout. Po přiložení pozitivní šablony a jejím osvětlení se místa, která nemají být průchodná vytvrdí. Oblasti, které nebyly osvětleny se při oplachu smyjí a tím zprůchodní pro následný tisk pasty. [7; 8]

- **Nepřímá šablona** – Na pracovní fólii je aplikována fotocitlivá vrstva. Po nanesení pozitivního motivu se nanese emulze a fólie se sloupne. Dojde k vytvoření šablony a zprůchodnění míst kresby (viz. Obrázek 1.6). [7; 8]

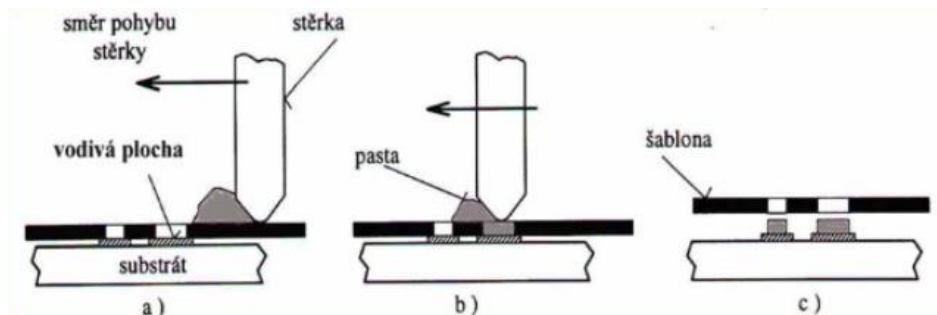


Obrázek 1.6 Ukázka a) přímé šablony b) nepřímé šablony [7]

1.3.2 Šablonový tisk

Šablonový tisk je jakousi obdobou sítotisku. Hlavní rozdíl mezi těmito metodami nanášení past na substrát spočívá v provedení šablony. Zatímco u sítotisku je síto vytvořeno z polymerních materiálů či kovových drátů způsobem tkaní, u šablonového tisku jsou šablony vytvářeny z ocelových či bronzových planžet. [7]

Princip je velmi podobný jako tomu bylo u sítotisku, avšak zde nedochází k odtrhu těrky již při roztírání pasty (viz. Obrázek 1.7). Místo toho zde dochází k odtrhu celého stolu tiskového stroje až po natištění celého vzoru. Rychlost odtrhu stolu musí být dostatečná pro oddělení šablony a nanesené pasty. [7; 9]

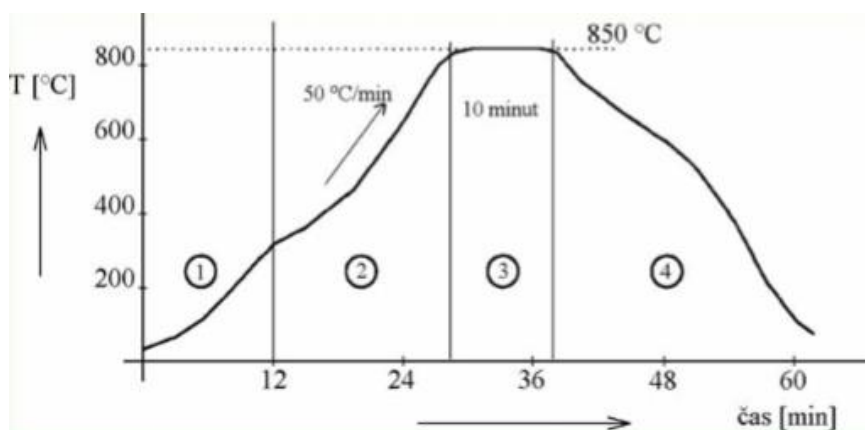


Obrázek 1.7 Princip nanášení TLV past pomocí šablonového tisku šablony [7]

1.4 Vypalování TLV

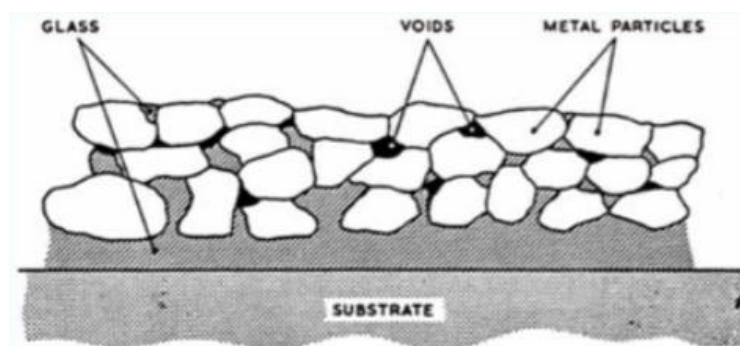
Vypalování, také někdy nazývané jako sintrování, je technologický postup následující po natisknutí TLV past na substrát. Je to nezbytný krok k vytvrzení daných past a zajištění jejich vlastností. Při vypalování se tavivová složka TLV past vypálí už přibližně při 200 °C. Teplota výpalu a doba vypalování se liší podle druhu použité pasty. [9]

První zóna je určena pro sušení substrátu. V druhé fázi dochází k přehřevu substrátu, aby nedošlo k teplotnímu šoku. K samotnému výpalu dochází až ve třetí zóně, kdy se pohybujeme okolo 850 °C po dobu 10 minut. Jako poslední fáze následuje pozvolné chladnutí substrátu (viz. Obrázek 1.8). [9]



Obrázek 1.8 Teplotní průběh vypalování TLV [9]

Po výpalu tavivová složka klesne a vytvoří přechod mezi funkční složkou dané pasty a substrátem. Funkční složka, jež se dostala na povrch, nyní dokáže plnit svou funkci v závislosti na použité pastě (vodivá, odporová, dielektrická, ...) (viz. Obrázek 1.9).



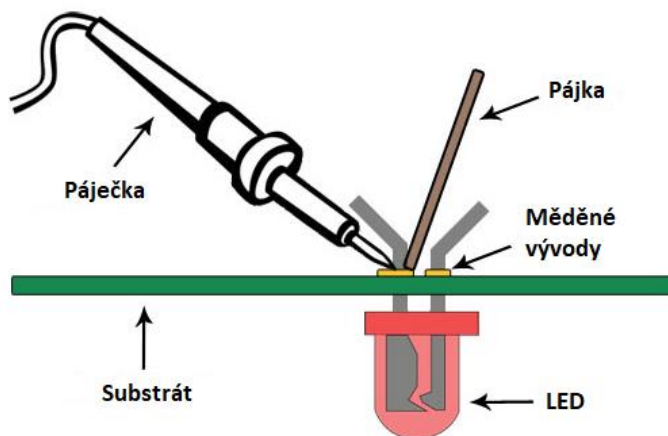
Obrázek 1.9 Sktruktura TLV pasty po vypálení [9]

2. METODY PŘIPOJOVÁNÍ VÝVODŮ NA VODIVOU TLUSTOU VRSTVU

2.1 Pájení

2.1.1 Ruční pájení

Pájení je proces, při němž dochází ke spojování dvou nebo více elektronických součástek pomocí roztavené pájky okolo jejich vývodů. Pájka je kovová slitina, která při vychladnutí vytvoří silný elektrický spoj mezi součástkami. I přesto, že pájení vytvoří trvalý spoj, lze jej odstranit dle potřeby odpájením pomocí příslušného nástroje. Pro ruční pájení se využívá měkkých pájek, které disponují nižší teplotou tavení než tvrdé pájky. [10]



Obrázek 2.1 Princip selektivního pájení součástek

Pro selektivní pájení lze použít Páječku, která je přímo zapojená v zásuvce a průchodem proudu se hrot ohřívá (viz. Obrázek 2.1), nebo pájecí stanici, která navíc disponuje možností nastavení potřebné teploty hrotu. [10]

2.1.2 Pájení přetavením

Dalším způsobem připojování vývodů je pájení přetavením, který spočívá v nahřátí celého substrátu na teplotu tavení použité pájecí pasty. Pájení přetavením probíhá nejprve natištěním pájecích past na vodivou vrstvu. Do pájecích past se osadí součástka či vývod a následně dojde k přetavení v zařízení zvaném přetavovací pec. [11]

Přetavení je rozděleno do tří hlavních částí a to předeřev, přetavení a chlazení. Předeřevu je zapotřebí proto, aby nedošlo k teplotnímu šoku substrátu či součástek. Přetavení se provádí při teplotách tavení použitých vodivých past a následným chlazením zajistíme ztuhnutí těchto past a vytvoření pevného vodivého spoje. [11]

2.1.3 Materiály pro pájení

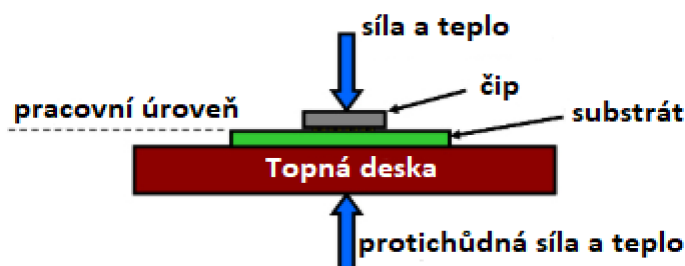
Pájky by se daly jednoduše rozdělit na olovnaté a bezolovnaté. Olovnaté pájky (např. Sn60Pb40) mají teplotu tavení nižší než pájky bezolovnaté ($t_t=183\text{ °C}$). Mají lepší smáčivost, lesklý vzhled, ale výpary při tavení jsou z důvodu přítomnosti olova toxické. Bezolovnaté pájky (např. SAC305) mají teplotu tavení vyšší ($t_t=227\text{ °C}$). Bezolovnaté pájky disponují vyšší pevností spoje a výpary nejsou toxické, avšak povrch pájeného spoje je matný nikoliv lesklý. [12]

S využitím nekompatibilních pájek a vysokých teplot může dojít k jevu zvaný leaching. Dojde zde k odsmačení TLV do pájky. Tento jev je blíže popsán v kapitole, kde je experimentálně testováno sváření na TLV (viz kapitola 3.2).

2.2 Svařování

2.2.1 Termokompresní svařování

Připojování pomocí tepelné komprese je možno použít k připojování drátu. K vytvoření kvalitního spoje se součástka a substrát musejí nejdříve nahřát na přibližně 300 °C . Poté se přitisknou k sobě na zhruba půl vteřiny definovanou silou a tím vznikne spoj (viz. Obrázek 2.2). [13]

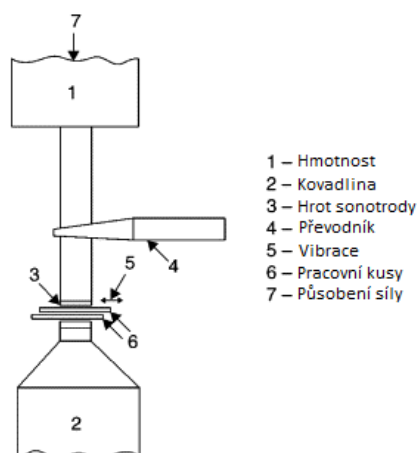


Obrázek 2.2 Princip funkce tepelné komprese [13]

2.2.2 Ultrazvukové svařování

Ultrazvukové svařování je jednou z nejpoužívanějších svářecích metod používaných v elektrotechnice. Ultrazvukové svařování využívá energii ultrazvuku při frekvencích 20-40 kHz a produkuje mechanické vibrace nízkých amplitud. Vibrace generují teplo

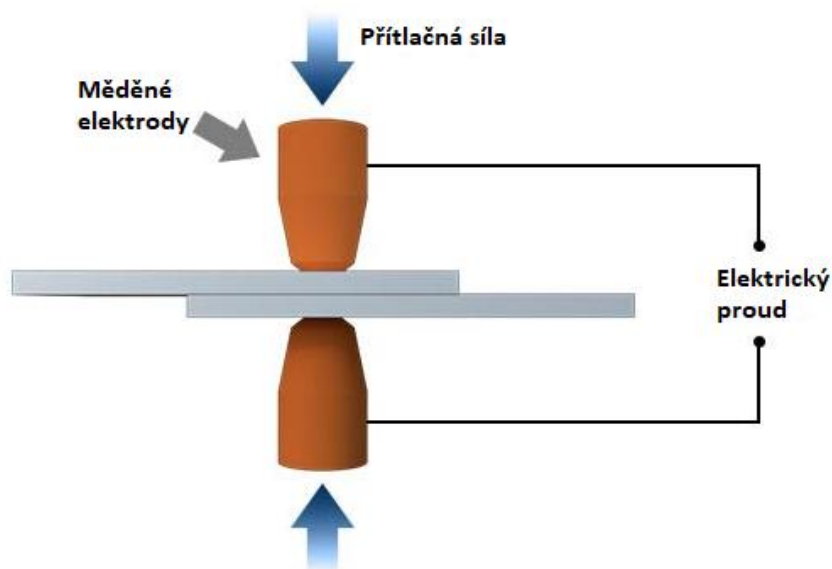
v místě spoje daných součástek (viz. Obrázek 2.3). Tento typ svařování je nejrychlejší známá metoda svařování jejíž doba svaru se pohybuje v rozmezí 0,1-1 s. [14]



Obrázek 2.3 Princip ultrazvukového svařování [14]

2.2.3 Bodové svařování

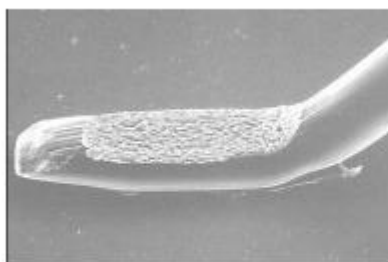
Jedna z nejstarších odporových sváření, která funguje na principu spojení dvou nebo více kovových plíšků. Metoda funguje tak, že měděné elektrody jsou na povrchu svařovaných materiálů a průchodem proudu dojde k natavení plíšků (viz. Obrázek 2.4). Po jejich vychladnutí vznikne spoj. [15] Tato metoda je později využita pro dosažení potřebných svarů (viz. kapitola 3.8). Optimalizací tohoto procesu je za úkol získat jak mechanicky, tak opticky vyhovující spojení mezi TLV a niklovými plíškami.



Obrázek 2.4 Princip funkce bodového svařování [15]

2.2.4 Wirebonding

Wirebonding je způsob elektrického propojení využívající přítlačnou sílu, teplo a ultrazvuk k vytvoření spoje (viz. Obrázek 2.5). Wirebonding je sváření v pevné fázi, kdy dochází mezi svařovanými materiály (drátem a ploškou) ke sdílení elektronů a interdifúzi atomů a tím k vytvoření kontaktu. [16]



Klínový spoj



Kuličkový spoj

Obrázek 2.5 Dva hlavní druhy spojení drátu a plošky pro wirebonding [16]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato kapitola se zabývá návrhy vytvořenými v semestrální práci a testy včetně optimalizací vytvořených v bakalářské práci:

1. Úprava svářecích hrotů bodové svářečky SUNKKO 709A (viz. kapitola 3.1)
2. Test svarů na TLV bez galvanického pokovení (viz. kapitola 3.2)
3. Návrh motivu pro galvanické pokovování substrátu (viz. kapitola 3.3)
4. Teoretický výpočet pro galvanické pokovení substrátu (viz. kapitol 3.4)
5. Praktická výroba multimotivu pro substrát 50x50mm (viz. kapitola 3.5)
6. Výměna měděných elektrod svářečky za wolframové (viz. kapitola 3.6)
7. Optimalizace galvanického pokovování motivů (viz. kapitola 3.7)
8. Optimalizace svářecího procesu a testování kvality svarů pomocí mechanických testů a mikrovýbrusu (viz. kapitola 3.8)
9. Vyhodnocení dosažených výsledků (viz. Závěr)

3.1 Úprava svářecích hrotů bodové svářečky SUNKKO 709A

V této práci byla použita bodová svářecí stanice SUNKKO 709A, která disponuje dostatečným nastavením parametrů pro naši aplikaci (viz. Obrázek 3.1). Toto zařízení také disponuje technologií pájení.



Obrázek 3.1 Detailní popis pulzní bodové svářečky SUNKKO 709A

Následujícími testy bylo zjišťováno, zda je možné svářet na stříbrnou TLV. Nejčastěji se tato bodová svářečka využívá pro sváření niklových plíšků o tloušťkách 0,05 až 0,2 mm pro poniklovanou ocel a 0,05 až 0,15 mm pro čistý nikl. [17]

Specifikace pro svářecí část [17]:

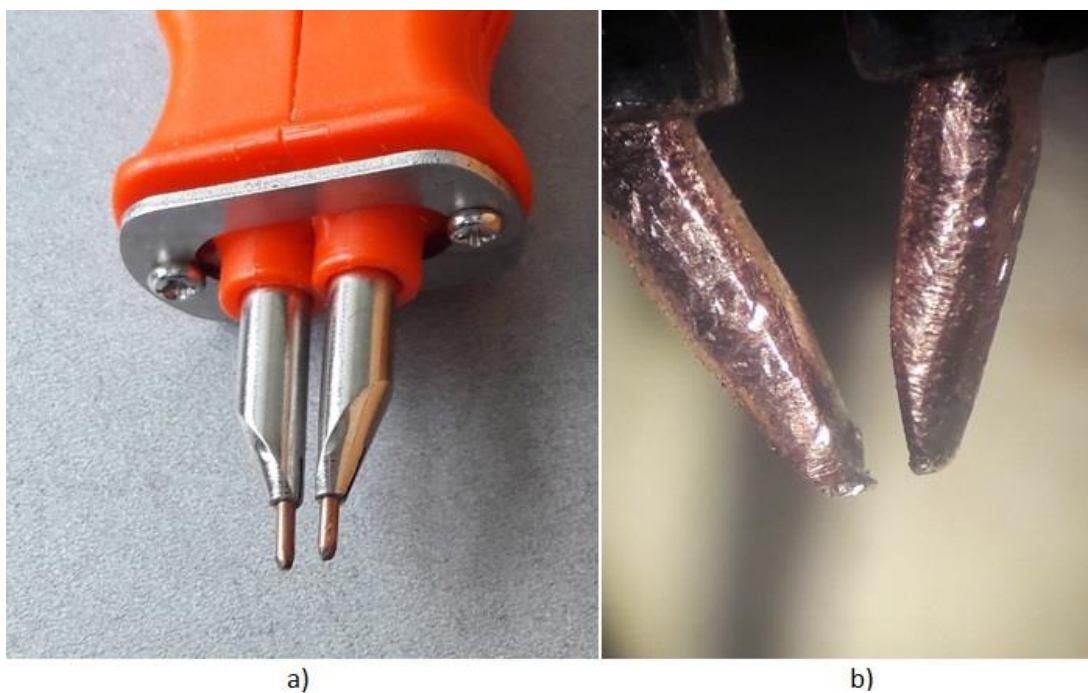
Vstupní napětí: AC 110 V/220 V \pm 10%

Svářecí proud: 50 ~ 800 A

Čas jednoho pulzu: 5 ms

Maximální množství pulzů: 18

Jako první věc, která byla potřeba upravit byly elektrody pohyblivého svářecího pera. Jejich vnitřní stěny se od sebe z výroby vzdalují 1,95mm což je příliš mnoho, pro využití svařování na TLV plošky. Bylo zapotřebí dané elektrody mechanicky upravit a to pilováním, broušením a ohýbáním, dokud nebylo dosaženo požadovaného tvaru a vzdálenosti elektrod pro míněnou aplikaci (viz. Obrázek 3.2). Po těchto krocích bylo dosaženo vzdálenosti vnitřních stěn elektrod 0,65 mm, což je pro požadovanou aplikaci přijatelné.



Obrázek 3.2 Hroty pohyblivého svářecího pera a) před úpravou a b) po úpravě

3.2 Test svarů na TLV bez galvanického pokovení

Elektrody pohyblivého svářečního pera jsou vyrobeny z mědi. Po vytvoření několika testovacích svarů bylo zpozorováno mírné zčernání elektrod (viz. Obrázek 3.3). Tomuto by mohlo být zabráněno využitím jiného materiálu na elektrody, např. wolframu. Průměr použitých měděných elektrod je 1,5 mm [17]. Ty by se teoreticky daly nahradit wolframovými elektrodami o rozměrech 1,6mm a případně průměr zmenšit broušením [18]. Tím by se mohlo eliminovat případné opalování elektrod.



Obrázek 3.3 Detail hrotů svářečky a jejich zčernání

Další nutností, pro ověření metody svařování na TLV, byl výběr správných vývodů. Při bodovém svařování baterií do tzv. battery-pack, se ke spojování článků využívají niklové nebo niklem pokovené plíšky (viz. Obrázek 3.4).



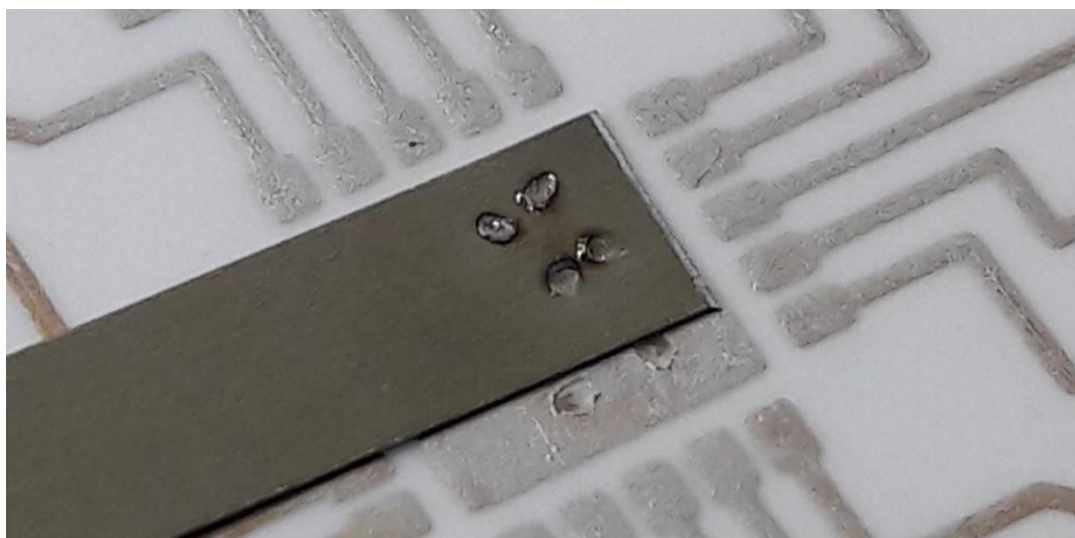
Obrázek 3.4 Používané materiály pro vývody při bodovém svařování

Tabulka 3.1 Přehled používaných materiálů pro bodové svařování

č.	Materiál	Rozměry [mm]	Elektrický odpor [mΩ/100 mm]	Průchozí proud [A]	Odolnost proti oxidaci
1	Poniklovaná ocel	0,2*5*100	12,2	2,5~8	Normální
2	Čistý nikl	0,15*8*100	6,9	10~15	Dobrá
3	Poniklovaná ocel	0,15*5*100	17,2	2~5	Normální
4	Poniklovaná ocel	0,1*4*100	31,3	1~3	Normální

Pro samotný test svaru je využit plíšek č.4 (viz. Tabulka 3.1). Jedná se o nejtenčí z výše uvedených materiálů. Testován byl právě tento typ, z důvodu nejvyšší náchylnosti na zvýšení proudu svářečkou (viz. Obrázek 3.5). Nejlepšího spojení bylo dosaženo nastavením proudu na 360 A při čtyřech pulzech.

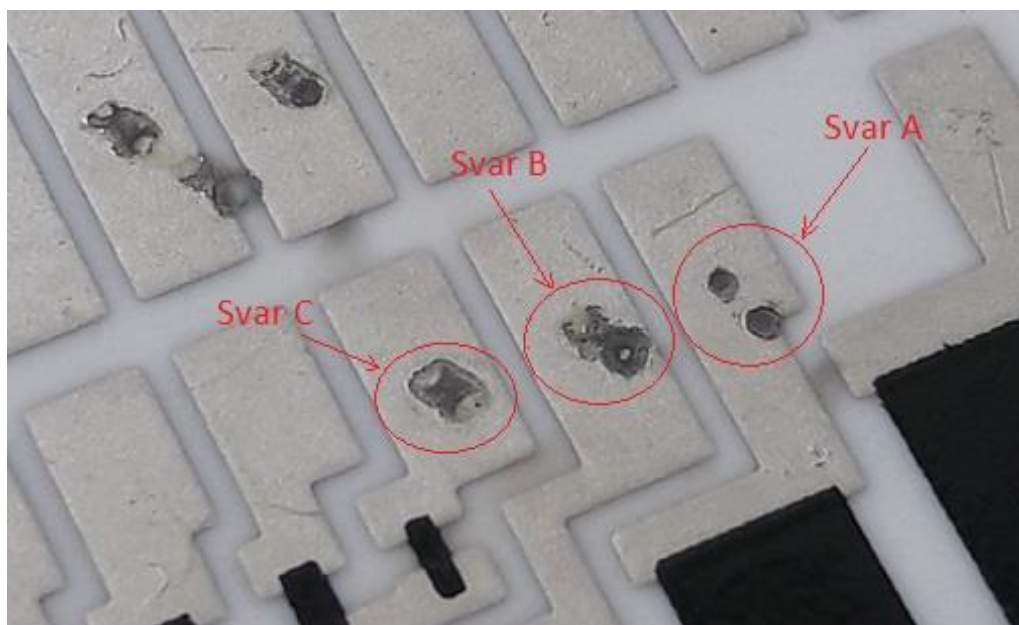
Důvodem, proč došlo k uchycení niklového plíšku k TLV je natavení plíšku i samotné funkční složky TLV a po vychladnutí k jejich spojení. Mechanická pevnost se liší podle osy, ve které působí síla, avšak pokaždé byla tato mechanická pevnost nedostatečná.



Obrázek 3.5 Niklem pokovený plíšek svařený k TLV pomocí dvou svarů

Mohlo zde dojít k podobnému jevu jako je leaching. Je to jev, při kterém se separuje pevná matrice ze složky působením tepelné energie.

Tuto delaminaci lze pozorovat při zvýšené teplotě kdy dojde k natavení TLV pasty a v důsledku tohoto jevu dojde k separování funkční složky a tavivové složky. To může být také důvodem, proč jsou vidět po odtržení niklových pásků díry v TLV (viz. Obrázek 3.6). Materiál, který by měl být na substrátu, je ze spodní strany niklového pásku.



Obrázek 3.6 Pohled na TLV vývody po odtržení niklových pásků

Nastavení svářečky pro dané svary

Svar A–4 pulzy, $I_{\text{svar}} = 360 \text{ A}$, $t_{\text{pulz}} = 5 \text{ ms}$

Svar B–4 pulzy, $I_{\text{svar}} = 400 \text{ A}$, $t_{\text{pulz}} = 5 \text{ ms}$

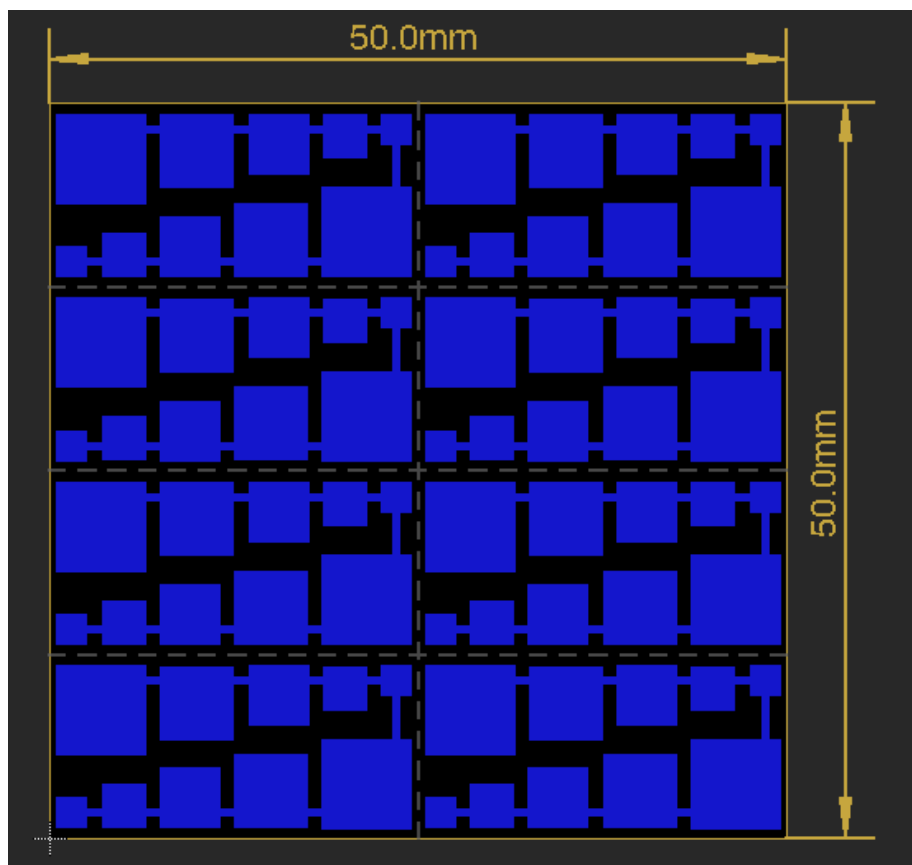
Svar C–4 pulzy, $I_{\text{svar}} = 420 \text{ A}$, $t_{\text{pulz}} = 5 \text{ ms}$

Kde I_{svar} je proud svářečky a t_{pulz} je doba jednoho pulzu. Z těchto hodnot lze říct, že nejlepšího svaru bylo dosaženo při nastavení hodnot jako pro svar A.

Nutno však podotknout, že výsledný svar neměl dostatečnou mechanickou pevnost a z tohoto důvodu by aplikace bez galvanického pokovení neměla v praxi využití. Proto se následující kapitola (viz kapitola 3.3) zabývá touto problematikou.

3.3 Návrh motivu pro galvanické pokovování substrátu






Od navrženého motivu je požadována variabilnost testování. Jinými slovy je nutné zajistit, aby motiv disponoval vyčerpávajícím množstvím testovatelných subjektů. Z tohoto důvodu byl navržen motiv v programu Eagle, který obsahuje dostatečné množství vývodů různých velikostí pro následné testování (viz. Obrázek 3.7). Množství a rozměry daných plošek jsou přehledně zaznamenány v tabulce (viz. Tabulka 3.2). Vodivé cesty jsou zde pro možnost galvanického pokovování.



Obrázek 3.7 Návrh Multi-motivu pro experiment galvanického pokovování

Multi-motiv je vhodně zvolen pro velikost substrátu 50x50 mm. Tato velikost keramického substrátu je taktéž k dispozici i v laboratořích VUT pro případné testování TLV.

Tabulka 3.2 Soupiska použitých plošek pro jeden substrát z navrženého Multi-motivu

Tvar plošky	Počet plošek	Rozměry [mm]	Celková plocha S_j [mm ²]
	2x	2*2	8
	2x	3*3	18
	2x	4*4	32
	2x	5*5	50
	2x	6*6	72
vodiče	9x	$8 \cdot (0,5 \cdot 1) + (0,5 \cdot 3)$	5,5
Celkem			185,5

Vzhledem k tomu, že je známa velikost substrátu i celkový součet všech plošek, je možné vypočítat celkovou plochu pokovení:

$$S_{sub} = l \cdot š \quad [mm^2] \quad (3.1)$$

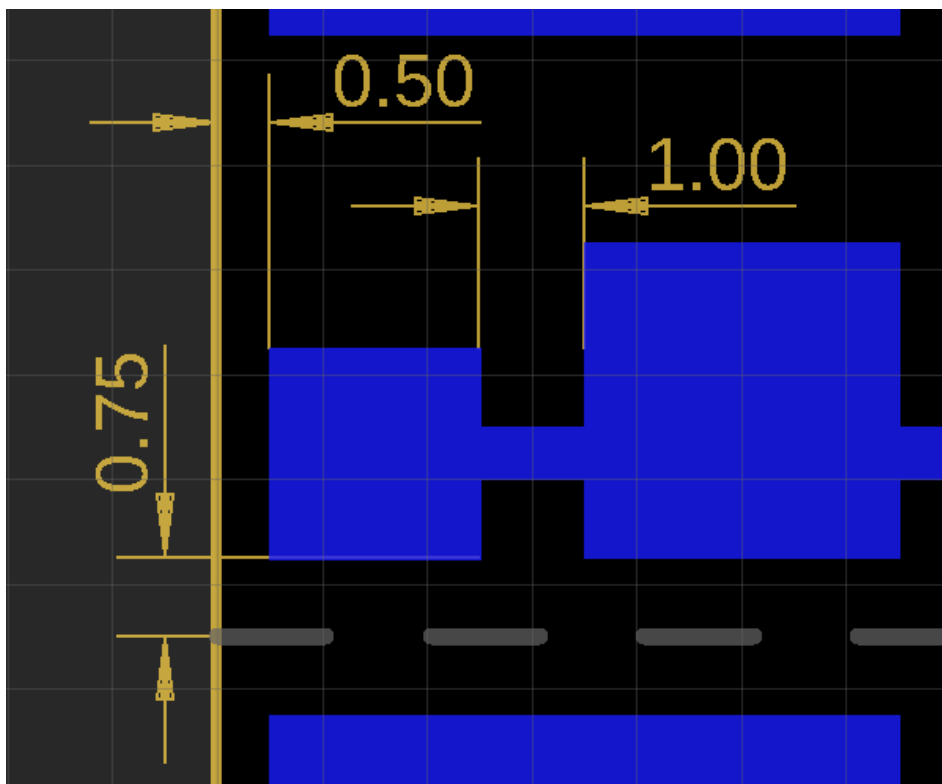
$$S_{sub} = 25 \cdot 12,5 = 312,5 \text{ mm}^2$$

$$S_{CPP} = \sum_{2 \times 2}^{6 \times 6} S_j \quad [mm^2] \quad (3.2)$$

$$S_{CPP} = 8 + 18 + 32 + 50 + 72 + 5,5 = 185,5 \text{ mm}^2$$

S_{sub} je plocha jednoho substrátu, l je délka jednoho substrátu, $š$ je šířka jednoho substrátu, S_{cpp} je celková plocha pokovení a S_j je plocha jednotlivých velikostí plošek.

V práci bylo využito návrhových pravidel pro zhotovení výsledného testovacího motivu. Přesněji řečeno byly dodržovány izolační vzdálenosti mezi vývody, které by měly být 0,5-1 mm a plošek od okraje substrátu minimálně 0,25 mm (viz. Obrázek 3.8).

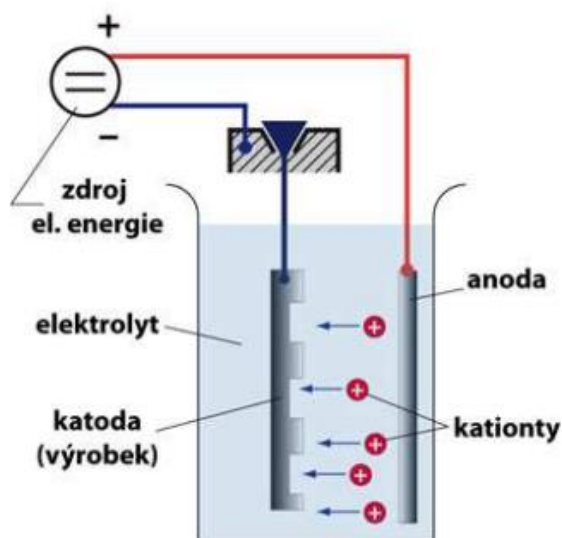


Obrázek 3.8 Okótované důležité parametry navrženého motivu

3.4 Teoretický výpočet pro galvanické pokovení substrátu

Jedná se o metodu, ke které dochází při stejnosměrném proudu procházející roztokem. Tloušťka možné nanesené vrstvy se pohybuje okolo 10-30 μm . [19]

Princip galvanického pokovování spočívá v ponoření dvou elektrod do elektricky vodivého roztoku, kterým bude procházet proud (viz. Obrázek 3.9). Na zápornou elektrodu (katodu) připojíme výrobek, který chceme pokovit a na kladnou elektrodu (anodu) připojíme materiál, jenž chceme nanášet na výrobek, v našem případě měď. [19]



Obrázek 3.9 Princip galvanického pokovování [19]

Takto nachystaný proces je připraven na nastavení parametrů pro dosažení požadované tloušťky nanesené měděné vrstvy [19]. Pro zajištění proudové hustoty je nutné zajistit svorkové napětí U_S :

$$U_S = U_r + R \cdot I \quad [V; V, \Omega, A] \quad (3.3)$$

Kde R je odpor elektrolytu, I je pokovovací proud a U_r je rozkladné napětí, což je nejmenší napětí potřebné k nepřetržitému vybíjení iontů stejnosměrným proudem. V této práci je řešeno galvanické pokovování více vrstev pro otestování kvality svaru.

Ze všeho nejdříve je zapotřebí vypočítat plochu pokovovaného motivu. Ta činí 1484 mm^2 (jedná se o výpočet plochy pro jeden samostatný motiv neboli 1/8 celkového multi-motivu). Jelikož je žádoucí vypočítat parametry pro nastavení galvanického procesu, je nutné z plochy vypočítat objem nanesené látky a následně její hmotnost.

Výpočty galvanického pokovení jsou uváděny pouze pro tloušťku nanášené měděné vrstvy $10 \mu\text{m}$, ale výsledky jsou i pro tloušťky $20 \mu\text{m}$ a $30 \mu\text{m}$.

$$\begin{aligned} S_{cpp} &= 185,5 \text{ mm}^2 \\ V_{10\mu\text{m}} &= S_{cpp} \cdot h \quad [\text{mm}^3; \text{mm}^2, \text{mm}] \\ V_{10\mu\text{m}} &= 185,5 \cdot 0,01 = 1,855 \text{ mm}^3 \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$m_{10\mu\text{m}} = \rho \cdot V_{10\mu\text{m}} \quad [g; g/cm^3, cm^3] \quad (3.5)$$

$$m_{10\mu\text{m}} = 8,96 \cdot 1,855 \cdot 10^{-3} = 0,01662g = 16,62 mg$$

Kde h je požadovaná tloušťka pokovené měděné vrstvy $10 \mu\text{m}$, ρ je hustota mědi a m je hmotnost nanesené vrstvy. S pomocí těchto hodnot a všeobecně známých konstant lze vypočítat čas pokovování při zadaném proudu. Výpočty byly prováděny pro proud roztokem $I=1 \text{ A}$. [20]

$$I=1 \text{ A}; \quad m_{10\mu\text{m}} = 16,62 \text{ mg} = 1,66 \cdot 10^{-5} \text{ kg};$$

$$M_m=63,5g \cdot \text{mol}^{-1} = 6,35 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1};$$

$$N_A=6,023 \cdot 10^{23}; \quad e=1,6 \cdot 10^{-19}; \quad v=2$$

$$t=?$$

kde M_m je molární hmotnost mědi, N_A je Avogadrova konstanta, v je oxidační číslo (modrá skalice neboli síran měďnatý má oxidační číslo 2+) a e je elementární náboj elektronu. Již byly uvedeny všechny známé veličiny potřebné k výpočtu času pokovování. Zde jsou uvedeny upravené rovnice pro výpočty daných časů pokovování, které vycházejí z 1. a 2. Faradayova zákona elektrolýzy (viz. rovnice 3.9) [20]:

$$t = \frac{m \cdot N_A \cdot e \cdot v}{M_m \cdot I} \quad [s; kg, -, -, -, kg/mol, A] \quad (3.6)$$

$$t_{10\mu\text{m}} = \frac{1,66 \cdot 10^{-5} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2}{6,35 \cdot 10^{-2} \cdot 1} = 51,35 \text{ s}$$

$$t_{20\mu\text{m}} = \frac{3,324 \cdot 10^{-5} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2}{6,35 \cdot 10^{-2} \cdot 1} = 102,83 \text{ s}$$

$$t_{30\mu\text{m}} = \frac{4,986 \cdot 10^{-5} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2}{6,35 \cdot 10^{-2} \cdot 1} = 154,25 \text{ s}$$

Vypočtené časy jsou pro jednotlivé požadované tloušťky pokovení substrátu. Jednalo se o tloušťky $10 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$ a $30 \mu\text{m}$. Z výše uvedených rovnic je patrné, že čas přímo závisí na nastaveném proudu protékajícím roztokem. Pokud bychom zvolili proud 2 A byl by teoretický čas $t_{10\mu\text{m}}=25,67 \text{ s}$. Jinými slovy čím vyšší proud roztokem protéká, tím kratší čas je potřebný na pokovování.

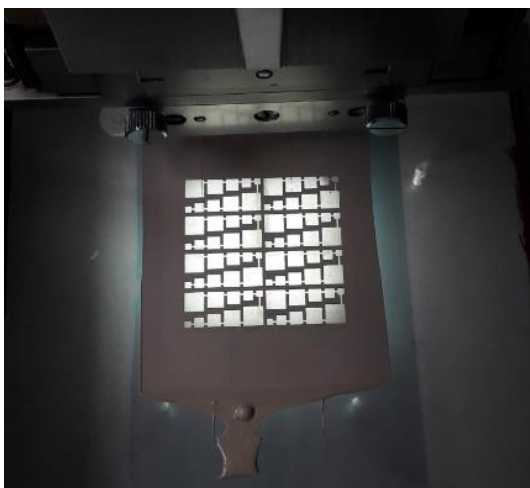
3.5 Praktická výroba multimotivu pro substrát 50x50mm

Pro vytvoření multimotivu je potřeba nejdříve důkladně vyčistit síto, které se následně ponoří do destilované vody. Na takto připravené síto se opatrně nanese fotorezist a válečkem se uhladí pro rovnoměrné rozložení (viz. Obrázek 3.10).



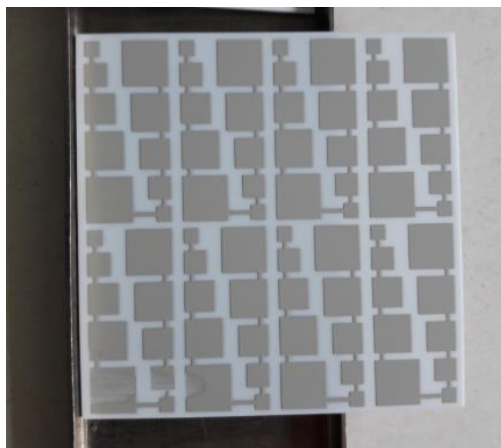
Obrázek 3.10 Nanesený fotorezist na sítu

Po těchto krocích se fotorezist vysuší studeným vzduchem, aby nedošlo k vytvrzení fotorezistu. Následuje samotný osvit skrze předem navrženou fólii, který probíhá 45 vteřin. Po osvitu se celé síto opatrně opláchne ve vodě, dokud se nezprůchodní neosvětlená místa a nevznikne tak požadovaný motiv.



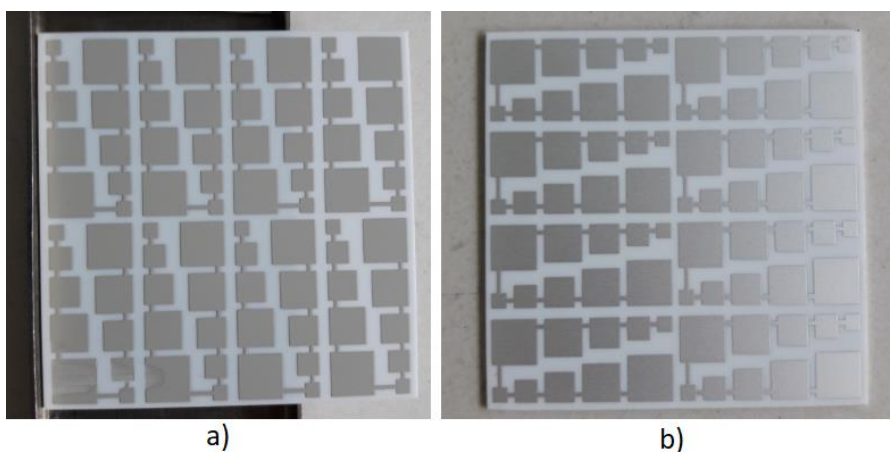
Obrázek 3.11 Princip nanášení pasty

Po důkladném nastavení sítotiskového zařízení, kterými jsou např. poloha substrátu pod sítom, odtrh těrky a přitlačná síta těrky na síto již lze začít se samotným tiskem TLV pasty na keramický substrát o rozměrech 50x50 mm (viz. Obrázek 3.11). Takovýmto způsobem došlo k natištění celkem 10 multi-motivů, přičemž každý takovýto substrát obsahuje 8 testovacích motivů (viz. Obrázek 3.12) což je celkem 80 testovatelných substrátů.



Obrázek 3.12 Jeden natištěný multi-motiv

Následně se vodivá TLV pasta na substrátech musí nechat vypálit při teplotě 850 °C po dobu 1 hodiny a 10 minut (viz. kapitola 1.4). Na vypálených substrátech je patrné, že textura motivu je hladší a odráží více světla v porovnání s nevypálenou pastou (viz. Obrázek 3.13).



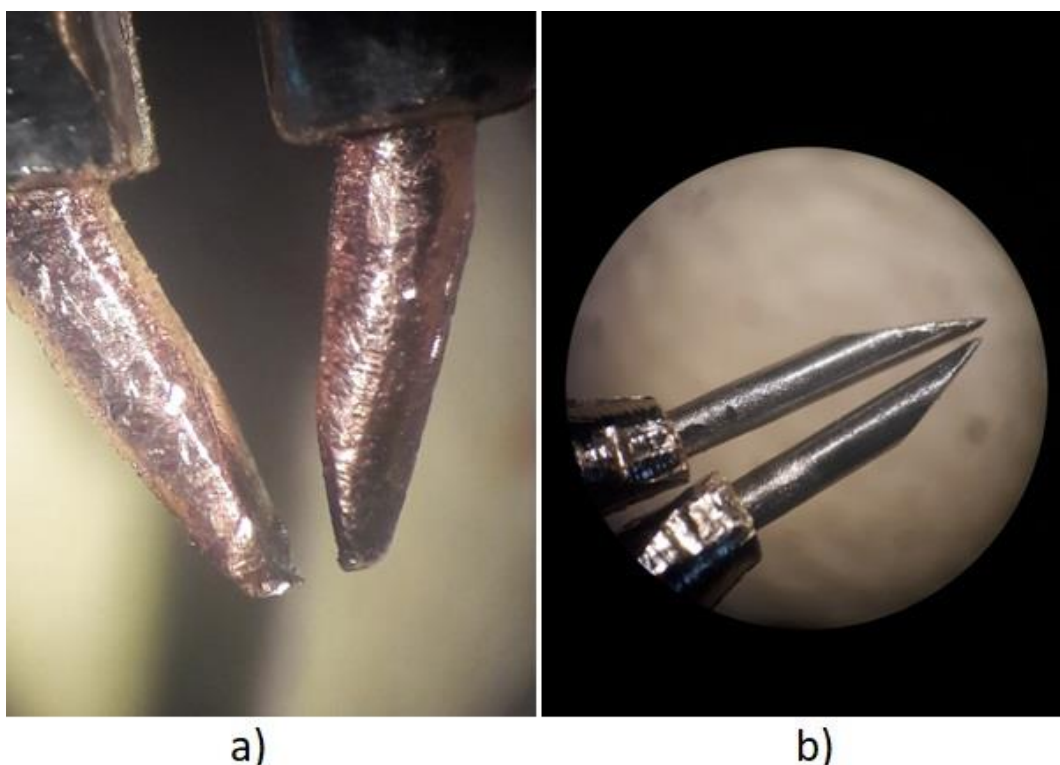
Obrázek 3.13 Příklad multi-motivu a) před b) po výpalu

Takto vypálený motiv je připraven na následné testovací svary nebo galvanické pokovování příslušnou tloušťkou mědi. Pro následnou aplikaci galvanického pokovování je třeba substrát rozdělit na požadovaných 8 motivů. Toho docílíme tak, že si jednotlivé okraje nařezeme pomocí diamantového hrotu a poté je lámáním o stůl nadělíme na požadovaný počet.

3.6 Výměna měděných hrotů svářečky za wolframové

Po opakovaných testech sváření na měděné plošky bylo zjištěno, že hroty vyrobené z mědi nebudou pro tuto aplikaci, kdy je snaha dosáhnout co nejmenší vzdálenosti elektrod, příliš vhodné. Z tohoto důvodu byl uplatněn poznatek zmíněn v jedné z předešlých kapitol (viz. kapitola 3.2), kdy se uvažovalo potencionální zaměnění měděných hrotů svářečky za hroty vyrobené z wolframu.

Wolframové elektrody byly objednány online a po jejich doručení bylo možné pokračovat v práci [18]. Na kotoučové brusce se pomalu vybrousil požadovaný tvar hrotu, kdy bylo potřeba zajistit co nejnížší vzájemnou vzdálenost hrotů a zároveň určit specifický kompromis mezi ostrostí a pevností hrotu. Po získání daného tvaru se hrot ulomil v dostatečné vzdálenosti a poté zabrousil. Takto upravené hroty byly připraveny pro následné vsazení do čelistí svářecího pera, kde byly mechanicky upevněny mechanickým semknutím čelistí (viz. Obrázek 3.14).



Obrázek 3.14 Upravené hroty svářečky a) měděné b) wolframové

Z výše uvedených obrázků je patrné, že výměnou hrotů bylo docíleno snížení vzdálenosti mezi jednotlivými hroty a tím zpřístupnění možnosti svařovat i menší plošky rozměrově 2x2 mm což je nejmenší dostupná svářecí ploška vyskytující se na navrženém motivu pro tuto práci. Také se v případě wolframu jedná o až třikrát tepelně odolnější materiál než v případě mědi.

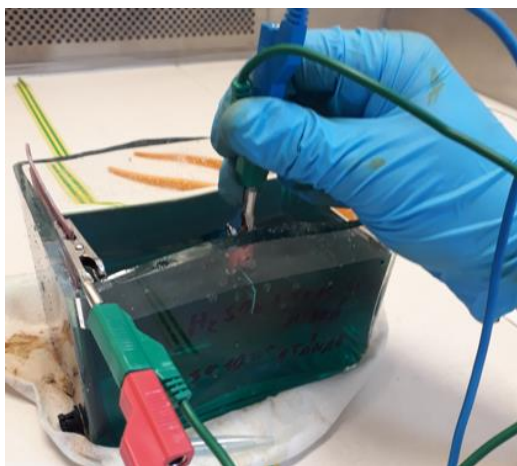
3.7 Optimalizace galvanického pokovování motivů

Ze všeho nejdříve je potřeba si dané multimotivu nařezat na menší motivy (viz. Obrázek 3.15), kterých je na jednom multimotivu osm. Takto nařezané motivy jsou nejen připraveny na následné galvanické pokovování, ale také jsou vhodnější pro případné testování daných svarů v tahu a zkoumání svarů v řezu pomocí mikrovýbrusů.



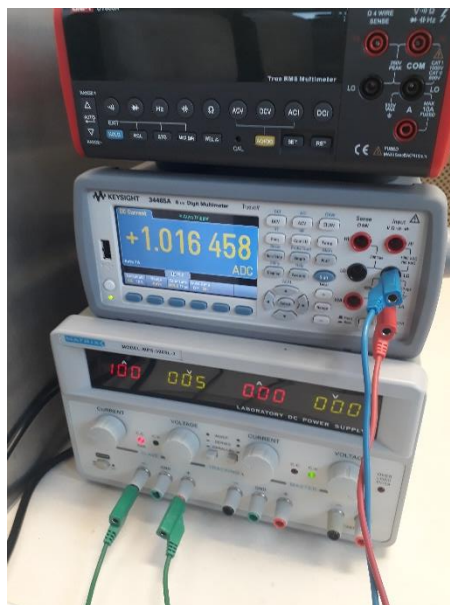
Obrázek 3.15 Rozřezání multimotivu na jednotlivé motivy

Po rozřezání multimotivu již můžeme přistoupit na samotné galvanické pokovování. Během přípravy je třeba si dát pozor, aby se obsluha nedotýkala prsty pokovovaných plošek, protože lidské dlaně a prsty obsahují miniaturní množství potu, který by mohl zapříčinit horší pokovovací vlastnosti. Taktéž je třeba čelisti, ve kterých je pokovovaný substrát upnut co nejméně ponořovat do roztoku, neboť to razantním způsobem změní vypočtenou pokovovací plochu a tím pádem i potřebnou délku pokovování jednoho substrátu.



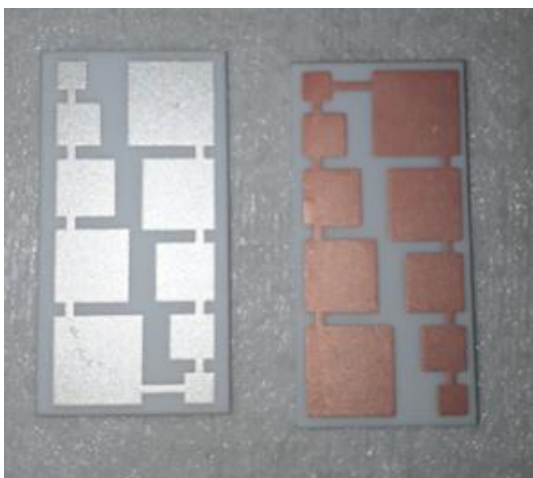
Obrázek 3.16 Samotný proces galvanického pokovování

Pracoviště pro galvanické pokovování obsahuje zdroj elektrického proudu, multimetr, s kterým budeme měřit proud procházející roztokem (viz. Obrázek 3.17), kádinku s roztokem modré skalice a měděnou elektrodu v kádince (viz. Obrázek 3.16).



Obrázek 3.17 Potřebná zařízení pro galvanické pokovování

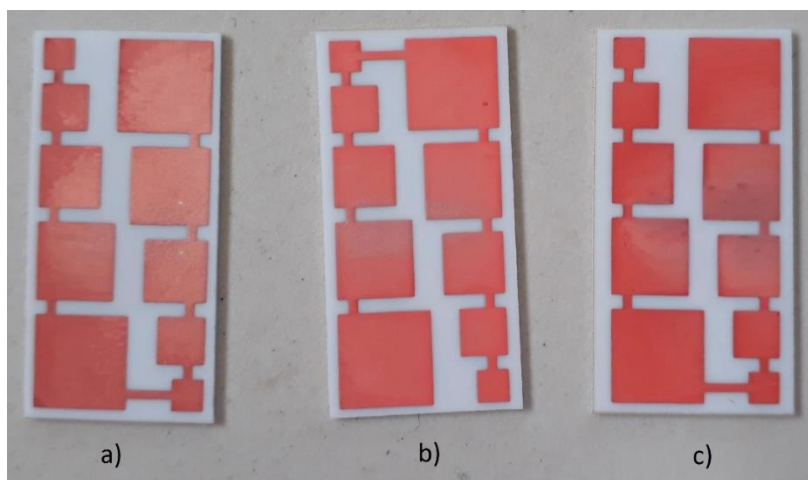
Galvanické pokovování je prováděno tak, že na zápornou elektrodu (katodu) je připojen daný motiv, který je zapotřebí pokovit a na kladnou elektrodu (anodu) je připojena měděná destička, která bude obohacovat roztok modré skalice během elektrolýzy, kdy budeme roztok ochuzovat v důsledku extrakce mědi na zápornou elektrodu (viz. Obrázek 3.18). Podle výpočtů uvedených v jedné z předešlých kapitol (viz. kapitola 3.4) budeme po stanovenou dobu vystavovat motiv proudu 1 A při napětí



Obrázek 3.18 Porovnání motivů před a po galvanickém pokovení 10 μm

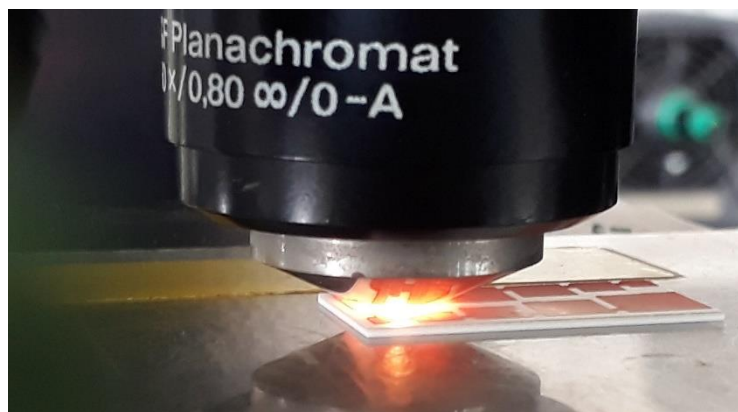
$\pm 0,5V$ (přičemž elektrodový potenciál mědi je $0,521 V$). Elektrody máme od sebe ve vzdálenosti $7cm$ od sebe, aby bylo zajištěno potřebné pokovení.

Vzhledem k tomu, že samotná tloušťka TLV je po vypálení $4 \mu m$, je zapotřebí v případě měření výsledné tloušťky pokovení k daným rozměrům přičíst i tyto $4 \mu m$. Tímto způsobem je vytvořeno 8 motivů pro každý typ tloušťky požadovaného pokovování což jsou tloušťky $10 \mu m$ (viz. Obrázek 3.19), $20 \mu m$ a $30 \mu m$ výsledného pokovování



Obrázek 3.19 Pokovené motivy tloušťkou a) $10 \mu m$ b) $20 \mu m$ c) $30 \mu m$

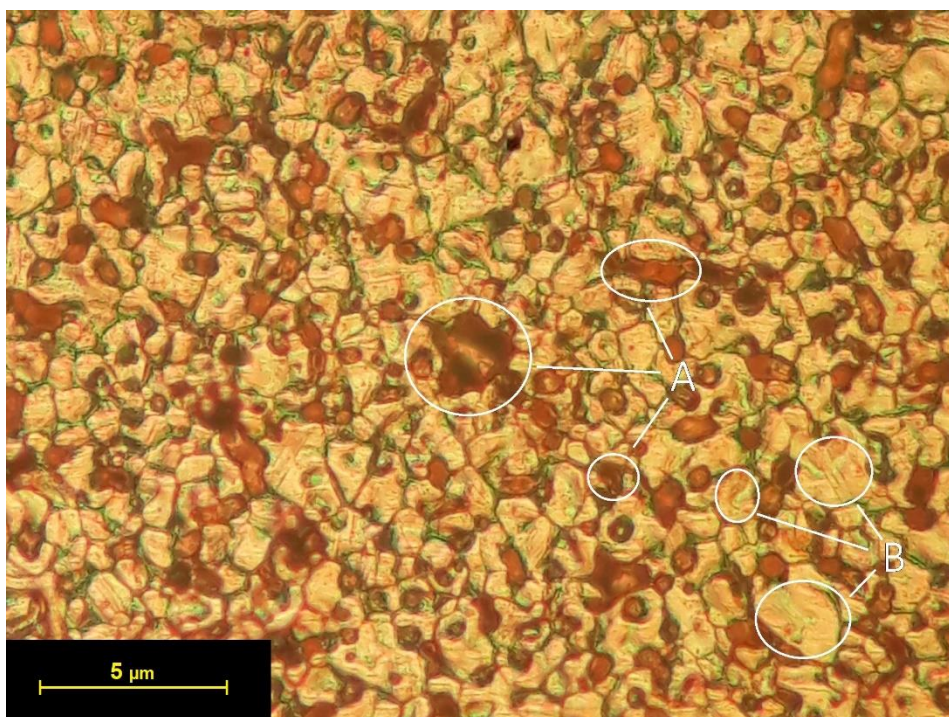
Takto pokovené plošky byly vloženy do mikroskopu jednak z důvodu orientačního zjištění tloušťky a také pro inspekci naneseného povrchu co se týče kvality. Tloušťka byla zjišťována tak, že se mikroskopem zaměřilo na pokovenou plošku a co nejpřesněji zaostřilo (viz. Obrázek 3.20), přičemž se odečetly dílky na zaostření. Poté se přešlo nad keramický substrát a opět se co nejlépe zaostřilo a odečetly dílky na zaostření. Rozdílem těchto dílků je výsledná tloušťka pokovení, ke které je také přičtena samotná tloušťka TLV po vypálení, což podle obdobného principu měření vyšlo $4 \mu m$. Je třeba zmínit, že takovýto způsob měření tloušťky je pouze orientační a slouží jakožto rychlá



Obrázek 3.20 Zkoumání povrchu pokovení pod mikroskopem

zpětná vazba, zda je proces pokovování správně nastaven. Přesnější hodnoty tloušťky jednotlivých pokovení se bude zjišťovat pomocí mikrovýbrusů v místě následných svarů.

Jakožto kvalitativní vyhodnocování jednotlivých typů pokovení je uvažována jednotlost celého pokovení, množství děr či výstupků a případných trhlin v pokovení. Na následujícím obrázku (viz. Obrázek 3.21) jsou vyobrazeny některé z těchto jevů, přičemž se jedná o typ pokovení 30 μm a zaostření bylo provedeno na největší plošku z celého substrátu tudíž 6x6 mm. Bylo využito padesátinásobného přiblížení pro blízkou inspekci povrchu.



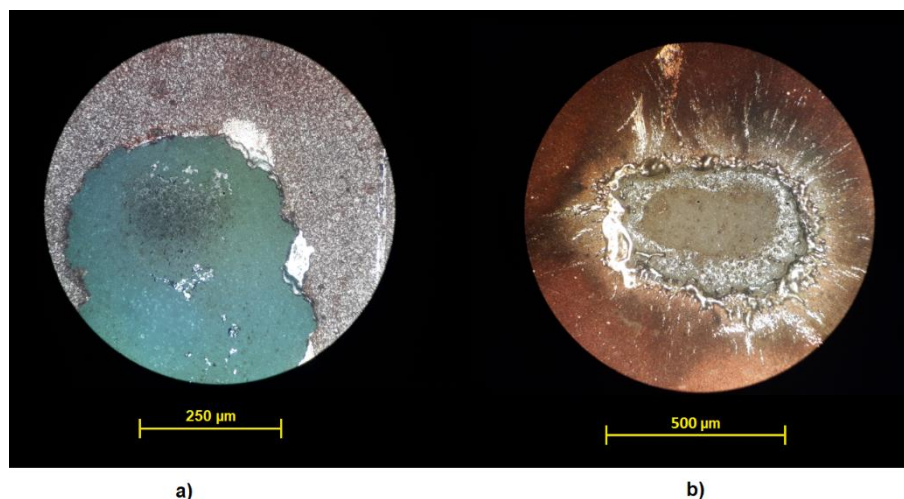
Obrázek 3.21 Části pokoveného povrchu 30 μm , kde se nachází A) díry a trhliny v povrchu mědi B) rovné plošky mědi

Jakmile je pokovených a prohlédnutých 8 motivů od každé požadované tloušťky (celkem 32 motivů včetně motivů bez pokovení) je možno přejít k samotnému testování daných svarů. Poté co bude proveden specifický svar bude daný motivy podroben testu v tahu, a to na speciální tahovém zařízení k těmto testům určenému.

3.8 Optimalizace svářecího procesu a testování kvality svarů pomocí mechanických testů a mikrovýbrusu

3.8.1 Optimalizace svářecího procesu

Před zahájením vytváření svarů bylo potřeba znovu zjistit, zda půjde na pokovenou vrstvu svařovat lépe než na nepokovenou. Mezi první specifika, která se projevila po výměně hrotů je to, že se wolframové hroty mnohem silněji přichycují ke svařovanému niklovému plíšku. Vzhledem k tomu, že při prvním svaru není dosažena dostatečná pevnost plíšku v tahu, tak dochází k odtrhnutí plíšku od pokovené vrstvy, přičemž zůstával plíšek přivařen k elektrodám. Tohoto jevu se dá vyvarovat, pokud je po svaření zajištěn viklající pohyb svářecího pera a tím dojde ke snadnému odpojení svařených hrotů od niklového plíšku. Taktéž bylo pro vědecké účely zjištěno, jak bude vypadat TLV vrstva s pokovením po odtržení niklu při běžných proudech a při velmi vysokých proudech (viz. Obrázek 3.22).



Obrázek 3.22 Povrch pokovených plošek po odtrhnutí niklového plíšku a při průchodu
a) ideálního proudu 250 A b) velmi vysokého proudu 300 A

Na výše vyobrazených mikroskopických pohledech (viz. Obrázek 3.22) je možné pozorovat, že ať už při proudech, u kterých dochází k pěknému spojení nebo u proudů, které jsou až příliš vysoké pro velikost povrchu kudy proud prochází jde vidět, že natavená vrstva je vždy až na samotný keramický substrát. Jinými slovy je vždy natavena celá šířka vrstvy. Z toho se dá předpokládat, že větší šířky pokovení budou mít větší šanci na uchycení daných plíšků při svařování.

Taktéž je možné pozorovat na druhém obrázku (viz. Obrázek 3.22b) jak okolí zčernalo což přineslo důležitý poznatek. Ten zní tak, že zčernání svářecích hrotů není až tak způsobeno materiálem, ze kterého jsou tyto hroty vytvořeny, ale dané opálení vzniká v důsledku průchodu vysokých proudů nad 300 A v případě wolframových elektrod. Lze také pozorovat mikroskopické kapky na okrajích daného svaru.

To je zapříčiněno tím, že při průchodu příliš vysokých proudů nedochází již pouze k dosažení bodu tavení jednotlivých materiálů, ale rovnou k dosažení bodu varu daných materiálů. Tím je zapříčiněno dané vření materiálů.

Pro testování pevnosti v tahu bylo použito různorodé nastavení svářečky pro obdržení objektivně nejsilnějšího svaru v tahu. Mezi nastavení bylo uvažováno: počet pulzů, velikost procházejícího proudu a typ niklového plíšku. Každý vzorek měl své specifické označení, dle kterého byl přesně identifikován. Každému typu nastavení svářečky byly vytvořeny tři nezávislé vzorky, kdyby náhodou jeden vykazoval nepřírozeně nižší pevnostní charakteristiky. A důležitou myšlenkou je to, že každý plíšek ať už k dosažení jeho svaru bylo použito jakéhokoliv nastavení svářečky, byl svařen šesti nezávislými svary (viz. Obrázek 3.23).



Obrázek 3.23 Všechny použité vzorky pro první testování nejlepšího nastavení svářecího procesu

K zajištění relativně odolných svarů v tahu je třeba skutečně využít alespoň šest samostatných svarů. To již teď prozrazuje, že počet uskutečněných svarů na plíšku bude mít na tahovou zkoušku velký vliv, ale nyní je potřeba zjistit, zdalipak využití pokovení jednotlivých vrstev hraje nějakou roli v pevnosti svaru.

Jednotlivé svary se v některých nastaveních shodovaly a v jiných zase lišily (viz. Tabulka 3.3). Mezi shodné parametry zde patří například nastavení pulzů, přičemž bylo zjištěno, že pro méně jak 18 pulzů nemá svařování dostatečnou pevnost (pro získání 18 pulzů je třeba zapnout všechny jednotlivé pulzy 8+6+4). Také záleželo na množství svarů, kterými byly jednotlivé niklem pokovené plíšky svařovány, přičemž zde se jednalo o 6 samostatných svarů pro každý ze svařovaných plíšků.

Mezi parametry, které se lišily patřily především proud nastavený svářečkou, který byl nastavován od hodnoty 200 A do 275 A. Dále se kvalita spoje odvíjela na použitém niklem pokoveném plíšku, kde byly využity dva plíšky uvedené v jedné z předešlých tabulek (viz. Tabulka 3.1, č.3 a 4).

Tabulka 3.3 Označení a nastavení jednotlivých svářecích procesů

Značení	Proud svářečkou [A]				Typ plíšku [A]		Počet svarů	počet pulzů	Tloušťka galvanického pokovení [μ A]		
	200	225	250	275	1~3	2~5	6	18	10	20	30
1	X					X	X	X	X		
2	X					X	X	X		X	
3	X					X	X	X			X
4		X			X		X	X		X	
5		X			X		X	X			X
6			X			X	X	X			X
7				X		X	X	X			X
8			X			X	X	X	X		
9			X			X	X	X		X	
10			X		X		X	X	X		
11			X		X		X	X		X	
12			X		X		X	X			X

Pokud bylo využito proudů nižších, než 250 A tak nebylo dosaženo svaru o dostatečné mechanické pevnosti v tahu. Pokud byl naopak využit vyšší proud, jako například zde 275 A či dokonce 300 A, tak docházelo místo k natavení materiálů přímo k dosažení jejich bodu varu a materiál začal prskat. Typ plíšku, jenž je vytvořen pro průchozí proudy 1~3 A disponuje ideální tloušťkou 0.1 mm.

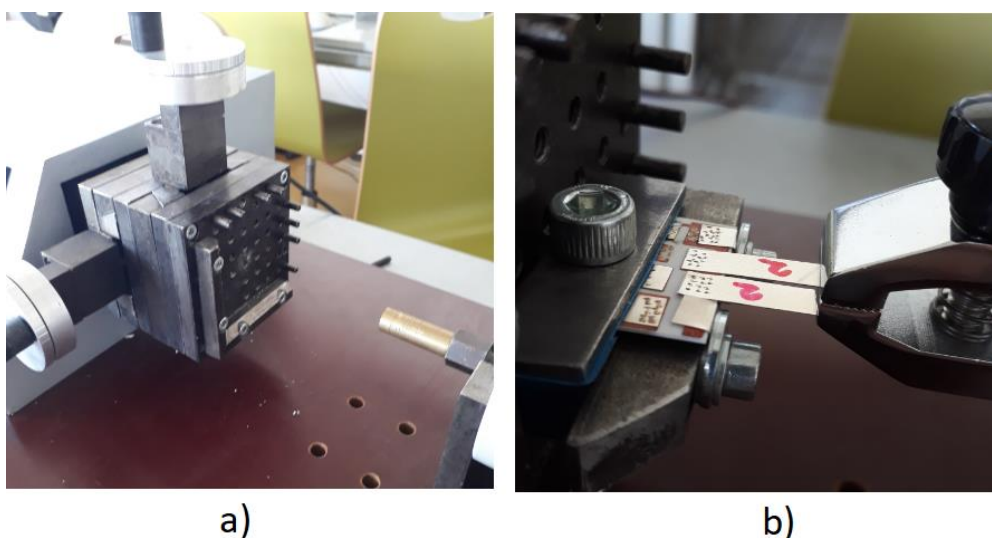
3.8.2 Testování kvality svarů pomocí mechanických testů

Jakmile jsou testovací vzorky připraveny, lze přejít k úpravě tahového zařízení sestaveného panem Janem Valíčkem, které bylo vyrobeno v rámci jeho diplomové práce (viz. Obrázek 3.24)[21]. Toto zařízení bude velmi užitečné v následujících testech.



Obrázek 3.24 Zařízení pro tahové zkoušky vodičů na DPS [21]

Nejdříve je třeba vymyslet způsob uchycení nejen keramické destičky se zhotovenými svary, ale i uchycovací čelisti, která bude za dané plíšky tahat a tím zjišťovat sílu potřebnou na jejich utržení. Uchycení keramické destičky probíhá tak, že se přitáhne mezi dva kovové plíšky, které zabráňují destičce ve vertikálním pohybu a následně dvě přesahující podložky zabráňují v horizontálním pohybu. Těch je zde zapotřebí, jelikož dvě již zmíněné kovové destičky, které keramiku svírají nelze dotahovat příliš, jinak dojde k rozlomení substrátu. Čelisti, které tahají za plíšek nebylo třeba nijak upravovat, a tak došlo jen k jejich nainstalování na protilehlou stranu stroje (viz. Obrázek 3.25).



Obrázek 3.25 Zařízení pro tahové zkoušky a) bez b) s uchycovacími čelistmi pro ujištění keramického substrátu a niklového plíšku

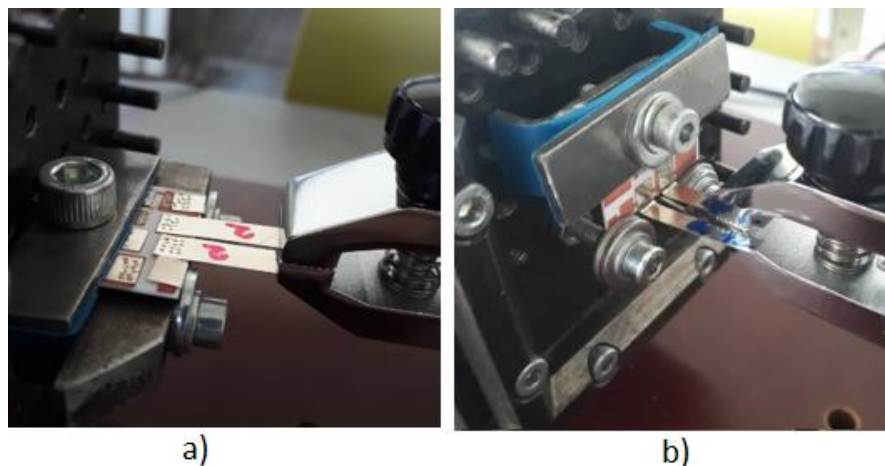
Testování každého plíšku probíhá tak, že se osadí testovaný substrát a vertikálně orientovaný šroub se přitáhne, tím docílíme uchycení ve vertikální ose. Poté se jen pomocí bočních klik na stroji přesune niklový plíšek, těsně pod horní čelist uchycovacích kleští, jež je následně utáhnut co největší silou. Nyní je substrát připraven k samotnému testování svaru. Na tahovém stroji je nastaveno manuální řízení polohy a zde byly využity tři režimy posuvu. Vysoká rychlost, která činí 37 mm/min, je příliš na testování, proto je v této práci využívána pouze k rychlému přemístění plíšku v prostoru. Pro testování bude využita střední rychlost, která činí 3.5 mm/min, což je dostatečné pro potřeby těchto testů. Malá rychlost činí 0.5 mm/min, a to je v případě zde testovaných vodičů nevhodné.

Tabulka 3.4 Naměřené hodnoty pro tahovou zkoušku stříhem

Nastavení svářecího procesu	Niklový plíšek 1~3A			Niklový plíšek 2~5A			Průměrná síla daného svaru [N]
	Síla v tahu [N]			Síla v tahu [N]			
	Test1	Test2	Test3	Test1	Test2	Test3	
1				32,7	48,6	X	40,7
2				36,4	44	46,2	42,2
3				45,2	42	40,8	42,7
4	86,7	94,3	101,2				94,1
5	92,2	85,4	78,9				85,5
6				40,4	33	35,7	36,4
7				48,6	X	X	48,6
8				12,7	15,6	X	14,2
9				X	38,1	33	35,6
10	113,8	127,6	121,5				121,0
11	123,6	141,8	136,8				134,1
12	139,7	142	145,9				142,5

Z výsledků testování (viz. Tabulka 3.4) je patrné, že mnohem lepšího mechanického spojení je zajištěno už jen tím, že zvolíme správný materiál plíšku a to typ č. 4 z dříve uvedené tabulky (viz. Tabulka 3.1). Takovýto užší materiál se za celkových 90 ms svařování nataví lépe než o pět setin tlustější materiál. Nejlepších svarů bylo obecně dosaženo při nastavení proudu na 250 A při 18 pulzech. Následné pokovení zvyšovalo výslednou mechanickou pevnost v tahu přibližně vždy o 10 % oproti předešlé velikosti pokovení. To se dá interpretovat tak, že při pokovení 30 µm dojde k vytvoření o 30 % silnějšímu svaru co se týče mechanické pevnosti ve stříhu než v případě bez pokovení dané TLV.

Následuje testování jednotlivých niklových plíšků v tzv. peel testu. Jedná se o destruktivní metodu testování, při níž se testovaný vodič ohne o 90° tak aby byl k substrátu kolmo a v tomto směru je následně testován v tahu. Nejdříve však musí být vytvořeny nové svary. Pro tento typ testů byly použity nastavení svářečky, při nichž bylo dosaženo největší pevnosti střihu, mezi které patří označení č.6, 7, 10, 11 a 12 z dříve uvedené tabulky (viz. Tabulka 3.3).



Obrázek 3.26 Rozdíl v uchycení dle typu tahového testu a) ve střihu b) při zkoušce přilnavosti (Peel test)

Byla potřeba i jistá úprava tahového zařízení pro možnou implementaci peel testů. Uchopení substrátu zde bylo uskutečněno ve svislé poloze tak aby se daly jednotlivé niklové plíšky testovat ve vodorovné poloze (viz. Obrázek 3.26) tak jak tomu bylo v předešlém případě destruktivního testování. Opět bylo k přesuvu substrátu v prostoru používáno vysoká rychlost posuvu a k samotnému testování střední rychlost posuvu tahového zařízení. Pro každý typ pokovení byly vytvořeny 4 vzorky pro objektivnost a přesnost daných testů (viz. Tabulka 3.5). Výsledný úsudek pevnostních zkoušek byl vytvořen na základě průměru potřebných sil v daných testech.

Tabulka 3.5 Naměřené hodnoty pro zkoušku přilnavosti (*Peel test*)

Nastavení svářečícího procesu	Niklový plíšek 1~3 A				Niklový plíšek 2~5 A				Průměrná síla daného svaru [N]
	Síla v tahu [N]				Síla v tahu [N]				
	Test1	Test2	Test3	Test4	Test1	Test2	Test3	Test4	
6					1	1,4	1,9	X	1,4
7					1,8	X	2,3	1,7	1,9
10	1,9	1,5	X	1,8					1,7
11	2	1,4	1,9	1,8					1,8
12	1,8	2,5	1,9	2					2,1

Z výsledků peel testu (viz. Tabulka 3.5) je patrné, že svary vytvořené touto metodou nejsou takřka vůbec odolné vůči pohybu tzv. „sloupnutí“, avšak pevnost daného spoje je dostatečná natolik, že při opatrnější manipulaci se daný plíšek neutrhne. Maximální hodnoty síly, kterou dokázaly jednotlivé svary ustát se pohybovaly okolo 2,1 N, což je oproti výsledkům z předešlého pokusu zanedbatelná pevnost.

Pro pevnost daných spojů, jak již dříve bylo zmíněno, jsou klíčové především 3 parametry kterými jsou počet svarů, počet pulzů a velikost daného proudu. Tím že bylo pro druhý typ testování vybráno 5 nejpevnějších typů svarů jsme eliminovali možnost nastavování pulzů a proudů jež jsou těmito typy definovány. Jinými slovy, jedinou možností, jakou by bylo možné docílit pevnějšího spojení v rámci peel testů by bylo zvýšení počtu jednotlivých svarů pro každou plošku.

3.8.3 Testování kvality svarů pomocí mikrovýbrusu

Také nazývaný jako metalografický výbrus je metoda, při níž se zkoumaný vzorek umístí do malé nádoby a zde se zalije předpřipravenou směsí epoxidové či methylnetakrylátové pryskyřice (MAA). Takto zalitý vzorek se nechá přibližně po dobu 1 hodin vytvrdnout pro možnost následného zbroušení. Výhodou použité methylnetakrylátové pryskyřice je rychlé tvrdnutí, ale zase nemají tak dobrou schopnost zatékat do užších otvorů či skulin jako je tomu u epoxidu. Vzhledem k tomu, že zde nejsou žádné otvory kde by měla směs zatékat, je použita právě methylnetakrylátová pryskyřice (viz. Obrázek 3.27).



Obrázek 3.27 Tekutá a sypká složka Methylnetakrylátové pryskyřice

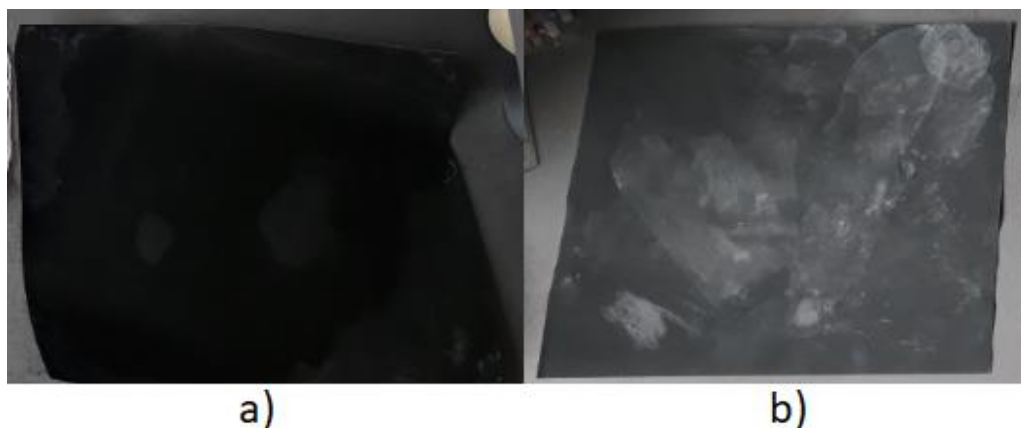
Po důkladném promíchání, obou z výše uvedených složek methylmetakrylátové pryskyřice, ve vhodné nádobě a přesném poměru který činí 100 dílků sypké složky na 45 - 55 dílků tekuté složky dojde k následnému zalití jednotlivých substrátů. Byly celkem zality čtyři typy substrátů, přičemž každý z nich zastupuje určitou úroveň pokovení (bez pokovení, 10 μ m, 20 μ m a 30 μ m) (viz. Obrázek 3.28).



Obrázek 3.28 Čtyři typy pokovení a) před b) po zalití do methylmetakrylátové pryskyřice

Nyní je již třeba pouze počkat na potřebné vytvrzení pryskyřice a poté je možné se přesunout na opracovávání daných kvádrů. Opracování po vytvrzení bylo provedeno nejprve pomocí brusného kamene rotujícího v kotoučové brusce. Tímto kamenem bylo docíleno hrubého odebrání materiálu, dokud se nenarazilo na niklový plíšek, kde se daná část opracování přerušila.

Následujícím procesem po hrubém broušení je jemnější broušení pomocí dvou zrnitostí brusných papírů a to hrubosti 800 a 1500 (číselné označení jednotlivých hrubostí popisují počet zrn na cm²) (viz. Obrázek 3.29). Nejdříve je prováděno broušení hrubším brusným papírem o zrnitosti 800 zrn/cm² do té doby, dokud není při optické inspekci pod mikroskopem vidět počátek svařeného přechodu. Broušení jednoho vzorku zde probíhalo přibližně 40 minut v rámci první hrubosti papíru, přičemž bylo po celou dobu broušení zajištěné dostatečné zvlhčení povrchu papíru.



Obrázek 3.29 Brusné papíry o hrubosti a) 800 b) 1500

Po dosažení požadovaného přechodu se vzorek důkladně opláchnul, aby na něm nezbyly zrníčka z předešlého hrubšího papíru a přešlo se na jemnější brusný papír o zrnitosti 1500 zrn/cm². Zde již broušení probíhalo v řádech jednotek minut, přičemž se zde jedná převážně o přechodný proces mezi broušením a následným leštěním.

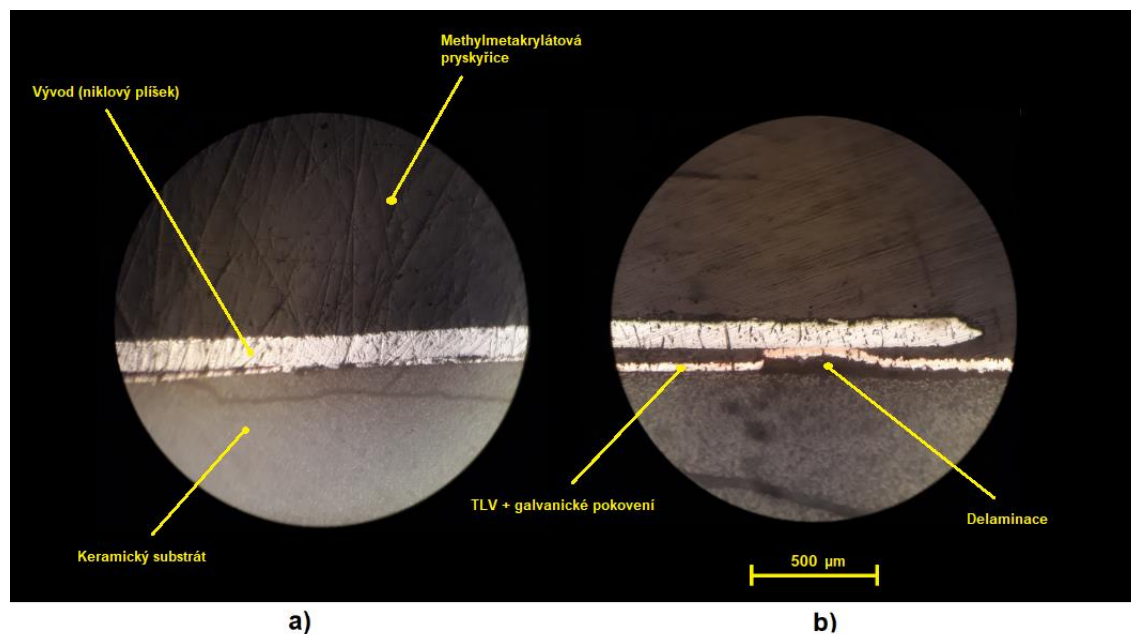
V neposlední řadě je třeba vyhladit zkoumaný povrch s využitím diamantových brusných past (viz. Obrázek 3.30). Zde bylo postupně použito čtyř typů past, přičemž se jednalo o velikosti jednotlivých zrn 20 µm, 5 µm, 2,5 µm a 0,5 µm. Je zde velmi zásadní, jako v předešlém případě, kdy bylo využíváno broušení pomocí jednotlivých zrnitostí, mezi jednotlivými hrubostmi důkladně oplachovat vzorek, aby nedocházelo ke kontaminaci jemnějších past hrubšími zrnky.

Čím jemnější je výsledný povrch tím méně bude přítomných rušivých nerovností při následné optické inspekci a tím přehlednější bude výsledná struktura vytvořeného svaru v řezu. V průběhu broušení a leštění docházelo průběžně ke sledování těchto nerovností pod mikroskopem až do doby, kdy bylo dosaženo požadované hladkosti povrchu.



Obrázek 3.30 Použité diamantové brusné pasty o hrubostech zrn 20 µm, 5 µm, 2,5 µm a 0,5 µm

Poslední krokem, po dosažení předem stanovené hladkosti povrchu, je optická inspekce svarů v řezu. Pro přehlednost a porovnání zde byly uvedeny pouze dva nejvíce kontrastní vzorky, a to vzorek bez galvanického pokovení plošek a vzorek s galvanickým pokovením plošek o tloušťce 30 μm (což bylo v této práci uvažováno jako největší galvanické pokovení) (viz. Obrázek 3.31).



Obrázek 3.31 Optická inspekce mikro výbrusu pro substrát
a) bez galvanického pokovení b) s galvanickým pokovením 30 μm

S využitím mikrovýbrusu (resp. metalografického výbrusu) bylo zjištěno, že v případě substrátu bez pokovení je zde jen velmi malá vrstva (pouze TLV o tloušťce 4 μm po vypálení) na kterou se může niklový plíšek přichytit. Z uvedeného obrázku (viz. Obrázek 3.31a) je patrné, že zde k natavením a následnému ztuhnutí TLV při průchodu proudu dojde, avšak z předešlých testů (viz. kapitoly 3.8.2 a 3.8.3) víme, že z pohledu mechanické pevnosti se nejedná o příliš kvalitní svary z pohledu mechanické pevnosti v tahu.

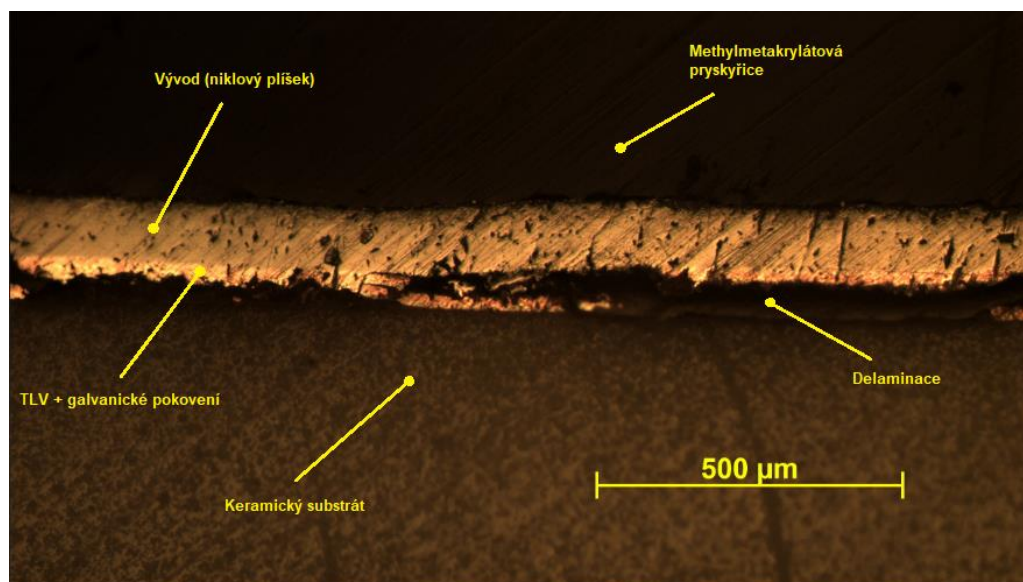
V případě s galvanickým pokovením 30 μm (viz. Obrázek 3.31b) lze pozorovat jev zvaný delaminace, přičemž je v tomto případě tento jev velmi patrný. I přes to, že opticky vypadá tato varianta méně přívětivěji než v případě bez galvanického pokovení, jedná se až o 40 % mechanicky pevnější svar, než je tomu v prvním případě bez galvanického pokovení. To je způsobeno lepším natavením svařovaného materiálu, které následně mnohem lépe odolává mechanickému namáhání.

Vhledem k tomu, že delaminace dané vrstvy je nežádoucí jev, byl uskutečněn nový testovací vzorek, na němž se vyskytují dvojice reprezentujících svarů, přičemž každá dvojice reprezentuje jiné nastavení svářečského proudu. Jednalo se zde tedy celkem o šest dvojic svarů, přičemž dva byly uskutečněny při nastavených proudech svářečkou 200 A, 225 A a 250 A, při maximálním počtu pulzů což je zde 18 a s niklovým plíškem určený pro průchozí proudy 1~3 A. Na nově vytvořeném vzorku byly využity všechny již použité kroky na předešlých vzorcích. Těmito kroky jsou galvanické pokovení substrátu požadovanou vrstvou (v případě tohoto vzorku se jednalo o tloušťku 40 μm), vytvoření předem definovaných svarů pomocí bodové svářečky a zalití vzorku do methylmetakrylátové pryskyřice a její následné vytvrzení. Následuje broušení nejprve nahrubo pomocí kotoučové brusky pro odstranění přebytečného materiálu a následně jemnějšími papíry 800 a 1500 pro získání daných svarů v řezu. Takto získané přechody jsou následně vyleštěny sérií diamantových past, tak jak to již bylo popsáno dříve v této práci.



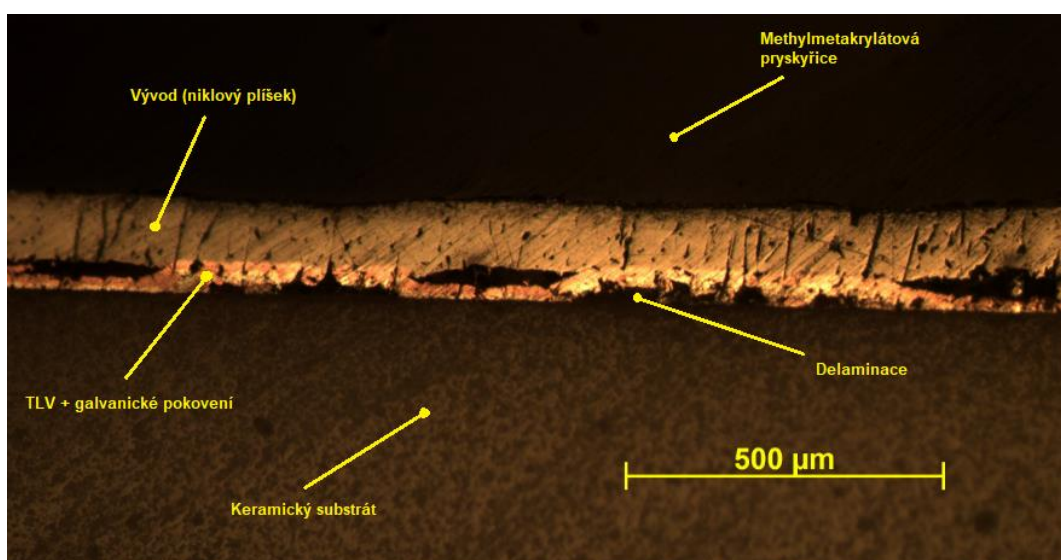
Obrázek 3.32 Motorizovaný mikroskop ZEISS Axio Imager 2

Výsledný vzorek, jehož úprava byla dostatečná pro vyobrazení důležitých přechodů ve struktuře byl podroben optické inspekci na motorizovaném mikroskopu ZEISS Axio Imager 2 (viz. Obrázek 3.32). Zde bylo pro vytvoření výsledných snímků použito desetinásobné přiblížení.



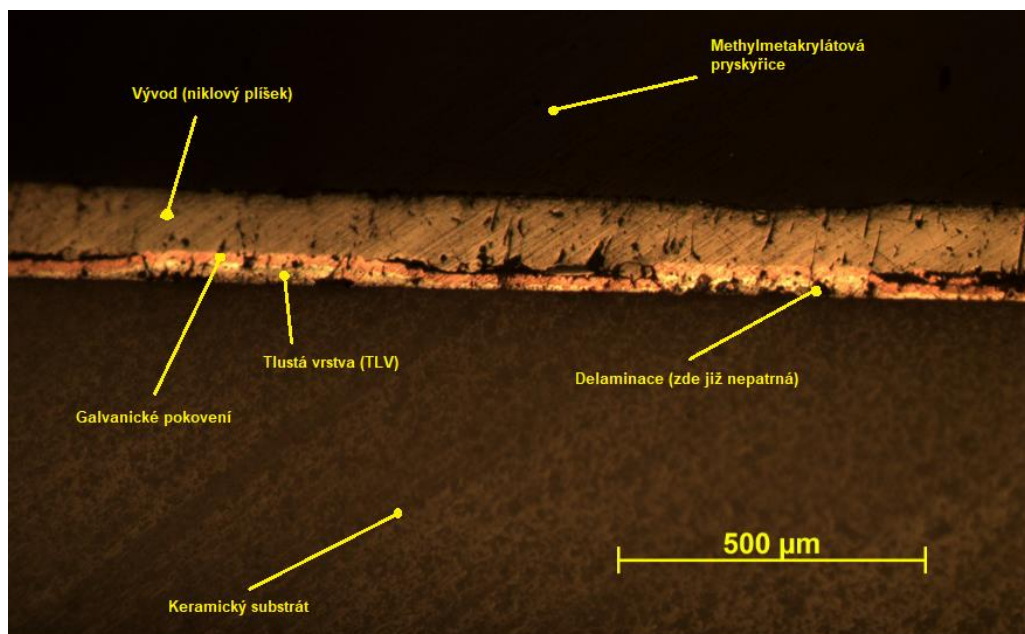
Obrázek 3.33 Svary při 250 A zobrazené pomocí mikroskopu ZEISS Axio Imager 2

Při použití proudu svářečkou 250 A, jak již bylo dříve zmíněno, je patrná delaminace TLV a galvanického pokovení od substrátu (viz. Obrázek 3.33). Jedná se o neuspokojivý svar z metalografického hlediska, ale uspokojivý svar z hlediska mechanických testů v tahu (vodorovné), kde se potřebná síla, pro odtržení niklového plíšku, pohybovala průměrně okolo 142,5 N.



Obrázek 3.34 Svary při 225 A zobrazené pomocí mikroskopu ZEISS Axio Imager 2

V případě nastavení proudu svářečkou na 225 A při 18 pulzech se jedná o nejlepší nastavení (viz. Obrázek 3.34). Je zde obdrženo nejen relativně přijatelného metalografického výbrusu z pohledu optické inspekce, ale i dostatečné mechanické pevnosti v tahu (vodorovném), která se v případě tohoto nastavení pohyboval průměrně okolo 85,5 N potřebných pro odtržení niklového plíšku. Stále je zde však velmi patrná delaminace vrstev od keramického substrátu.



Obrázek 3.35 Svary při 200 A zobrazené pomocí mikroskopu ZEISS Axio Imager 2

Typ svaru při využití proudu svářečkou 200 A nám poskytne bezkonkurenčně nejpěknější metalografický výbrus ze všech testovaných svarů, ve kterém jdou vidět jednotlivé vrstvy (Substrát, TLV, galvanické pokovení, niklový plíšek, methylmetakrylátová pryskyřice) a jejich vzájemné spojení (viz. Obrázek 3.35). Je zde pouze decentní náznak delaminace vrstev od substrátu tudíž lze tento typ svaru z metalografického hlediska považovat za kvalitní. Co se však týče mechanických testů v tahu (vodorovných), tak se jedná o nejslabší typ svaru ze testovaných svarů, přičemž se průměrná síla potřebná na odtržení niklového plíšku pohybovala okolo 42,7 N.

ZÁVĚR

V první části této práce byla vytvořena řešerše zabývající se různými způsoby připojování vodičů na TLV a materiály, které se k těmto metodám využívají.

Druhá část práce již zahrnovala realizaci návrhu optimálních substrátů pro následné testování. Při návrhu těchto substrátů byla dodržována návrhářská pravidla pro možnost vytvoření následného motivu. Jakmile byly vytvořeny potřebné substráty, došlo k prvotním testům svarů na TLV. Výsledné svary disponovaly malou pevností v tahu (řádově jednotky Newtonů) a z toho důvodu bylo přistoupeno k zesílení tlusté vrstvy v podobě galvanického pokovování jednotlivých motivů, a to tloušťkou pokovení 10 μm , 20 μm a 30 μm .

Z výsledků testování svarů v tahu bylo dosaženo nejkvalitnějšího svaru při nastavení svářecího zařízení na 250 A při 18 pulzech, přičemž jeden pulz měl délku 5 ms. Zároveň při použití užšího niklového pásu o tloušťce 0,1 mm bylo dosaženo přibližně dvakrát mechanicky pevnějších svarů než v případě druhého pásu o tloušťce 0,15 mm. Výsledky v případě *peel testů* vykazovaly, oproti tahovým zkouškám ve stříhu, malou mechanickou pevnost. Zatímco maximální pevnost u předešlých tahových zkoušek (stříhových) dosahovaly hodnot až 145 N, zde byla dosažena nejvyšší pevnost přilnavosti 2,5 N. Jinými slovy je třeba, při manipulaci s takovými substráty, zvýšená opatrnost. Taktéž zde byla použita metoda metalografického výbrusu a následné inspekce svaru pod mikroskopem. Zde bylo zjištěno, že při jednotlivých svarech dochází k tzv. delaminaci tlusté vrstvy. I navzdory zvýšené delaminaci svařovaného místa v případě, že se jednalo o galvanicky pokovené plošky o velikosti pokovení 30 μm jež měly až o 40 % pevnější svar v tahu, než tomu bylo v případě bez galvanického pokovení. Potlačení tohoto jevu je možné tím způsobem, že bude využíváno nižších svařovacích proudů, což má však za následek snížení pevnosti v tahu.

Nejkvalitnějšího svaru, z pohledu mikrovýbrusu, bylo dosaženo v případě nastavení svařovacího proudu na 200 A při 18 pulzech, avšak takovýto svar má průměrnou pevnost v tahu pouze 42,7 N. Nejlepšího výsledku při porovnání výsledků pevnosti v tahu (85,5 N) a soudržnosti tlusté vrstvy v místě svaru bylo dosaženo v případě nastavení svářecího proudu na 225 A při 18 pulzech. Nastavením svářecího proudu na 250 A při 18 pulzech vznikly svary s nejhorším případem delaminace tlusté vrstvy od substrátu, avšak jednalo se o nejpevnější svar v tahu (vodorovném) ze všech uvedených, přičemž zde byla průměrná síla potřebná na odtržení plíšku 142,5 N. Jinými slovy lze obdržet mechanicky pevnější svar na úkor vzhledu v metalografickém výbrusu. Pokud jsou nastaveny proudy svářečkou na 275 A nebo víc, tak dochází již k odpaření daných vrstev (TLV + galvanické pokovení) v důsledku příliš vysokých proudů v příliš krátkém časovém úseku (v případě 18 pulzů je doba svařování 90 ms). Naopak nižší proudy než 200 A nemají dostatečnou energii na roztavení materiálů a tím taktéž nedojde ke spojení mezi niklovým plíškem a TLV s pokovením.

Z výše uvedených důvodů lze vyvodit, že byla potvrzena možnost bodového svařování na galvanicky zesílené tlusté vrstvě. Pro zajištění ještě kvalitnějších svarů by bylo zapotřebí vyšší galvanické pokovení vodivých plošek, zvětšení počtu svarů na jednu plošku nebo zlepšit optimalizaci parametrů.

LITERATURA

- [1] Aluminium oxide. *Accuratus* [online]. Phillipsburg: Accuratus, 2013 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://www accuratus.com/alumox.html>
- [2] Korund. *PURECERAM* [online]. Hradec Králové: PURECERAM, 2005 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <http://www.pureceram.com/12-korund.html>
- [3] Technologie tlustých vrstev. *ELCERAM - keramické substráty* [online]. Hradec Králové: ELCERAM, 2005-2012 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <http://www.elceram.cz/cs/technologie-technologie-tlusty-ch-vrstev.html>
- [4] SOUKUP, Luděk. Tlusté vrstvy - tisk, vytvrzení, měření. *Anzdoc* [online]. ADOC.PUB, 2020 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://adoc.pub/tluste-vrstvy-tisk-vytvrzeni-meni.html>
- [5] MYŠKA, Pavel. *Tlustovrstvé struktury připravené z polymerních sítotiskových past* [online]. Praha, 2017 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/84833288.pdf>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ivana Beshajová Pelikánová.
- [6] ČVUT. *Tlusté vrstvy a tlustovrstvé technologie* [online prezentace]. In: ČVUT. Praha, 2015 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/1626/mod_resource/content/1/Tluste_vrstvy.pdf
- [7] ŘEZNÍČEK, Michal. *Tlustovrstvá technologie* [online]. , 20 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/244605/mod_resource/content/2/BPC-MTS_P%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ka_2.pdf
- [8] Sítotisk. *Technologie webgarden* [online]. [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://technologie.webgarden.cz/rubriky/graficke-techniky/sitotisk>
- [9] Tlusté vrstvy (Thick Films) (2). *DOCPLAYER* [online]. Brno: VUT, 2012-2013 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/41173783-Tluste-vrstvy-thick-films-2.html>
- [10] How to solder: A Beginner's guide. *Makerspaces* [online]. Makerspaces, 2014-2020 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://www.makerspaces.com/how-to-solder/>
- [11] Comparison between wave soldering and reflow soldering. *Tech Briefs* [online]. New York: Tech Briefs Media Group, 2018 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/pub/features/articles/28337>
- [12] Olovnaté a bezolvnaté pájky. *Kondik.cz* [online]. 2019 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://www.kondik.cz/olovnata-a-bezolovnata-pajka>

- [13] Tepelná komprese. *ABE.TEC* [online]. Ostřešany: ABE.TEC, 2014 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://www.abetec.cz/procesy-v-mikromontazi/tepelna-komprese/>
- [14] TROUGHTON, Michael J. Ultrasonic welding. *Handbook of Plastic Joining: A Practical Guide* [online]. 2nd edition. William Andrew, 2016, s. 15-35 [cit. 2021-06-03]. ISBN 978-0815515814. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815515814500044>
- [15] What is spot welding. *TWI* [online]. Cambridge (Massachusetts) [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-spot-welding>
- [16] *Wire Bond / Ball Shear Application Note* [online]. Dielectric laboratories [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://www.knowledscapacitors.com/getattachment/Products/Capacitors/Single-Layer-Capacitor/SLC-High-Reliability/V-Series/Wirebonding-Application-Notes.pdf>
- [17] *SUNKKO Model 709A: Battery Spot Welder with Soldering Function* [online manual]. SUNKKO, 2019 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://www.sunkko.net/content/JFHSW/709A-MANUAL.pdf>
- [18] Wolframová elektroda 1,6mm šedá WC20. In: *SVARTOP.CZ* [online]. [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://www.svartop.cz/svlarreclu-technika/wolframovla-elektroda-1-6-mm-raedla-wc20-2/>
- [19] JANKŮ, Roman. *Spínaný zdroj pro galvanické pokovování* [online]. Brno, 2011 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38790. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Dalibor Červinka.
- [20] *Faradayovy zákony elektrolyzy* [online]. realisticky.cz, 2020 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <http://www.realisticky.cz/ucebnice/02%20Fyzika%20S%C5%A0/04%20Elekt%C5%99ina%20a%20magnetismus/04%20Veden%C3%AD%20proudu%20v%20kapalin%C3%A1ch%20a%20plynech/02%20Faradayovy%20z%C3%A1kony%20elektrol%C3%BDzy.pdf>
- [21] VALÍČEK, Jan. *Návrh a realizace zařízení pro měření síly v tahu u SMD* [online]. Brno, 2013 [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68269. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Ing. Alexandr Otáhal.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

TLV	Tlustá vrstva
MMA	Methylmetakrylát
AC	Střídavý proud

Symboly:

M_m	molární hmotnost	(kg/mol)
N_A	Avogadrova konstanta	(-)
e	elementární náboj elektronu	(-)
t	čas	(s)
v	oxidační číslo	(-)
V	Volt (jednotka napětí)	
A	Ampér (jednotka proudu)	
Hz	Herz (jednotka frekvence)	
N	Newton (jednotka síly)	
°C	stupeň Celsia (jednotka teploty)	
Ω/\square	Ohm na čtverec	
cm	centimetr (jednotka délky)	
mm	milimetr (jednotka délky)	
mm/min	milimetr za minutu (jednotka rychlosti)	
$m\Omega$	miliohm (jednotka rezistivity)	
mm^2	milimetr čtvereční (jednotka obsahu)	
mm^3	milimetr krychlový (jednotka objemu)	
μm	mikrometr (jednotka délky)	
mg	miligram (jednotka hmotnosti)	
ms	milisekunda (jednotka času)	